

Анализ многолетней динамики вегетационного индекса для посевных площадей

Э.А. Терехин

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Федерально-региональный центр аэрокосмического и наземного мониторинга
объектов и природных ресурсов, Белгород, 308015, Россия
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru*

Исследована динамика вегетационного индекса NDVI для посевных площадей Белгородской области в период 2000–2014 гг. Анализ значений индекса выполнен на 342 временных срезах с интервалом в 16 дней. Результаты получены на основе значений NDVI, вычисленных на более 20000 посевных площадях региона на базе изображений MOD13Q1. Проанализированы особенности внутригодовой среднесезонной динамики индекса, типичной для посевных площадей. Установлено, что во всех районах области среднесезонная кривая NDVI имеет примерно одну и ту же форму. При этом наблюдаются территориальные различия в средних и максимальных районных значениях вегетационного индекса. В западной части Белгородской области для посевных площадей характерны более высокие среднесезонные значения NDVI, чем в восточной части. Установлено, что сезонная динамика индекса, типичная для посевных площадей, характеризуется периодом непрерывного роста, продолжающегося с начала февраля до первой половины июня, и периодом спада, характерного для остальной части года. При этом в осенний период с сентября по ноябрь наблюдается замедление темпов падения значений индекса, обусловленное вегетационной активностью на полях с озимыми культурами. С 2000 г. по 2010 г. для посевных площадей наблюдалась тенденция к снижению среднегодового значения индекса. Выявлена зависимость среднегодовых значений NDVI от влияния природных и антропогенных факторов на растительный покров посевных площадей в отдельные годы.

Ключевые слова: NDVI, MODIS, временной ряд, многолетняя динамика, растительный покров, посевные площади

Введение

Сельскохозяйственные угодья являются наиболее распространенным типом земель на территории Белгородской области. В связи с этим одним из ключевых компонентов ее растительного покрова является растительность посевных площадей, оценка состояния которой является актуальной задачей с учетом значительной роли сельскохозяйственного производства в экономике региона.

Современные подходы по мониторингу земель все шире опираются на растущие возможности спутниковых данных, что делает актуальным их использование, в том числе в задачах, связанных с изучением сельскохозяйственной растительности. Сезонные изменения коэффициентов спектральной яркости содержат информацию, которая может быть использована для анализа развития растительного покрова (Нильсон и др., 1983; Сидько, Шевырь-ногов, 1997; Спивак и др., 2009), включая его динамику под воздействием климатических факторов (Золотокрылин и др., 2000).

Подавляющее большинство типов сельскохозяйственной растительности, выращиваемых в регионе, характеризуется интенсивной сменой фаз развития, которая отражается в динамике спектрально-отражательных свойств (Терехин, 2012). По этой причине анализ сезонных и многолетних изменений в спектрально-яркостных характеристиках посевов, включая анализ рядов вегетационных индексов, представляет особый интерес, т.к. позволяет количественно оценить особенности растительного покрова и закономерности его временной дина-

мики (Пугачева, Швырногов, 2008; Тронин, Киселев, 2012). Результаты исследования многолетней динамики вегетационных индексов могут быть использованы для моделирования и прогнозирования продуктивности (Брыскин, 2007; Терехов и др., 2010) и урожайности сельскохозяйственных культур (Doraiswamy et al., 2005; Клещенко и др., 2011), комплексного анализа динамики растительного покрова (Гунин и др., 2004; Савин и др., 2011; Тулохонов, 2014).

Эффективный анализ сезонных изменений спектрально-отражательных свойств на уровне отдельных сельскохозяйственных полей стал возможен с начала 2000-х гг., когда начали поступать ежедневные данные с орбитального спектрорадиометра MODIS. Снимки, полученные этой аппаратурой, имеют 36 каналов и содержат, в том числе, изображения земной поверхности в красной и ближней инфракрасной зоне спектра с пространственным разрешением 250 метров. Несмотря на то, что указанное разрешение ограничивает возможности анализа спектрально-отражательных свойств небольших по площади полей, оно позволяет исследовать сезонную динамику яркостных характеристик большинства посевных площадей региона, средний размер которых составляет 49 га.

Одним из эффективных спектральных показателей, позволяющих оценивать состояния растительного покрова с точки зрения изменения его зеленой фитомассы и продуктивности, является вегетационный индекс NDVI, основанный на коэффициентах отражения в красной и ближней инфракрасной области спектра. Данные MOD13Q1, создаваемые на основе снимков MODIS (LPDAAC), содержат значения вегетационного индекса с интервалом в 16 дней (Vegetation Indices, 2014), что позволяет анализировать его динамику в течение года. К настоящему времени, после 15-летней работы сенсора, накопились архивы изображений, открывающие возможность анализа не только сезонной, но и многолетней динамики индекса, которая может быть использована для изучения растительного покрова.

Цель настоящего исследования заключалась в анализе сезонных и многолетних особенностей в динамике NDVI для посевных площадей Белгородской области и изучении закономерностей в его территориальном изменении. Объектом исследования выступали все посевные площади региона (свыше 1,5 млн. га).

Структура посевных площадей Белгородской области характеризуется сложным сочетанием полей с различными типами культур. Каждая из них характеризуется своими особенностями сезонного развития и, соответственно, динамикой NDVI. В то же время анализ значений индекса, усредненных со всех пахотных земель, также крайне актуален, т.к. позволит в целом охарактеризовать их растительный покров и его динамику, что необходимо для изучения растительного покрова региона в целом.

Материалы и методика исследования

При выполнении исследования придерживались принципа максимально возможной точности оценки значений вегетационного индекса. Объективный анализ значений NDVI посевных площадей требовал вычисления его значений в пределах маски их контуров на всей

территории Белгородской области. Для этой цели на основе снимков SPOT-5 с пространственным разрешением 5 м/пиксель, и на основе более детальных спутниковых данных с пространственным разрешением до 1–2 м/пиксель, нами был создан и топологически проверен векторный слой всех посевных площадей Белгородской области. На его базе впервые была получена детальная и достоверная информация о современном количестве и площади возделываемых полей, доли пахотных земель от площади районов и области в целом. Использование полученной маски контуров полей позволило рассчитать методом зональной статистики значения индекса для посевных площадей области, исключив из анализа все остальные категории земель, что обеспечило высокую точность при вычислении значений индекса.

Для оценки многолетней динамики NDVI нами был проанализирован максимально возможный период времени, охватываемый спутниковой съемкой MODIS с момента запуска сенсора, т.е. за 15 лет, с 2000 г. по 2014 г. включительно. Вычисление сезонных и многолетних рядов значений вегетационного индекса было выполнено на основе данных MOD13Q1 (LPDAAC), представляющих 16-дневные композитные изображения вегетационных индексов, включая NDVI. Для этой цели была проведена обработка 342 изображений за соответствующий период. Т.е. на каждый год (за исключением 2000 г.) проанализировали значения индекса за 23 временных среза.

Расчет ряда многолетних значений индекса был выполнен для каждой из более 30 000 посевных площадей Белгородской области, после чего были вычислены значения NDVI, усредненные для районов и всей области на каждую из 23-х исследуемых дат в течение года.

На основе полученной информации была выполнена оценка закономерностей в изменении среднемноголетних значений индекса на территории Белгородской области.

Исследование динамики NDVI включало несколько этапов:

- вычисление и анализ внутригодовой динамики NDVI, типичной для региона, на основе значений индекса, усредненных на каждую анализируемую дату (23 даты в год) с 2000 по 2014 гг.;
- анализ ряда многолетних значений вегетационного индекса за 15 лет;
- оценка динамики среднегодовых значений NDVI для посевных площадей за период 2001–2014 гг.

Применение данных MOD13Q1 для оценки значений вегетационного индекса посевных площадей имеет ограничения, обусловленные пространственным разрешением изображений. В связи с этим, для получения достоверных сведений о динамике индекса в регионе, анализ сезонных и многолетних значений NDVI был выполнен на основе информации, полученной с посевных площадей размером только более 20 га. При этом полученная выборка составила около 20 000 измерений и по объему была достаточной для анализа закономерностей в изменении индекса. Сезонная и многолетняя динамика NDVI посевных площадей была изучена для каждого административного района и для области в целом.

Выполнение поставленных задач требовало обработки значительного объема исходных данных, которая была проведена с использованием возможностей программного комплекса ArcGIS. Для анализа и моделирования динамики значений вегетационного индекса

был использован модуль Time series and forecasting (Временные ряды и прогнозирование) пакета STATISTICA 10.0.

Результаты и их обсуждение

Территориальная оценка значений вегетационного индекса в первую очередь заключалась в анализе средних и максимальных значений NDVI в районах области, полученных на основе данных за 15 лет, что было обусловлено тем, что максимальные внутригодовые значения индекса характеризуют пик вегетационной активности. Минимальные значения, достигаемые в зимний период, обусловлены наличием снежного покрова на полях.

Установлено, что наибольший среднемноголетний годовой максимум вегетационного индекса характерен для самого северо-западного и наиболее увлажненного Краснояружского района (*табл. 1*), в котором выпадает от 652 до 660 мм осадков в год. При этом наименьший, усредненный за это же время (т.е. за 15 лет) годовой максимум NDVI типичен для самого юго-восточного и наиболее сухого, Ровеньского района (525–550 мм осадков в год). Для Краснояружского района также характерно наибольшее среднегодовое значение индекса (*табл. 1*).

Таблица 1. Характеристики среднемноголетних значений NDVI для посевных площадей в районах Белгородской области, вычисленные на основе данных за 2000–2014 гг.

<i>Район</i>	<i>Количество измерений</i>	<i>Среднее за год</i>	<i>Годовой минимум</i>	<i>Годовой максимум</i>	<i>Ст. откл.</i>
Алексеевский	1596	0,380	0,002	0,712	0,240
Белгородский	969	0,403	0,023	0,747	0,248
Борисовский	429	0,396	0,021	0,740	0,240
Валуйский	1117	0,402	0,016	0,721	0,240
Вейделевский	1244	0,387	-0,009	0,715	0,241
Волоконовский	1063	0,388	0,009	0,744	0,247
Грайворонский	529	0,403	0,027	0,731	0,237
Губкинский	1190	0,381	-0,004	0,739	0,256
Ивнянский	687	0,396	0,008	0,756	0,256
Корочанский	1092	0,388	-0,002	0,743	0,256
Красненский	684	0,379	-0,005	0,721	0,251
Красногвардейский	1365	0,390	0,003	0,735	0,251
Краснояружский	408	0,415	0,013	0,779	0,257
Новооскольский	1011	0,389	0,001	0,737	0,256
Прохоровский	1029	0,386	0,002	0,740	0,255
Ракитянский	697	0,394	0,011	0,748	0,251
Ровеньский	763	0,384	-0,008	0,701	0,231
Старооскольский	1155	0,377	0,004	0,705	0,241
Чернянский	1006	0,383	0,000	0,718	0,247
Шебекинский	1123	0,403	0,015	0,753	0,249
Яковлевский	752	0,395	0,009	0,736	0,252

Территориальный анализ и сопоставление средних и максимальных внутригодовых значений вегетационного индекса подтверждает их более высокие значения для посевных площадей, расположенных в западных районах области, и более низкие – в восточных районах. Таким образом, несмотря на относительно небольшую площадь Белгородской области (27 134 км²), в ее пределах наблюдается территориальное изменение NDVI (рис. 1), в котором прослеживается связь с климатическими параметрами.

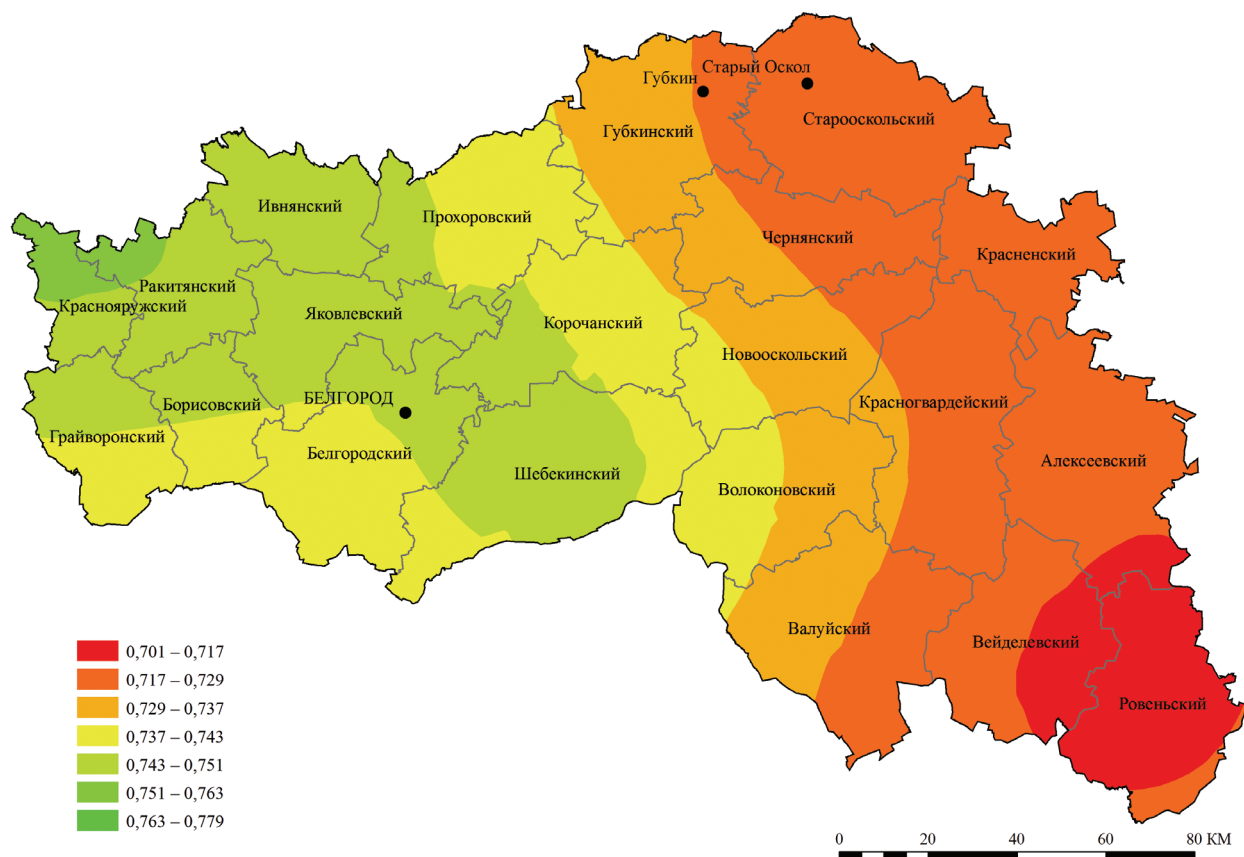


Рис. 1. Территориальное изменение максимальных внутригодовых значений NDVI для посевных площадей Белгородской области, вычисленное на основе данных за 2000–2014 гг.

Кривая динамики внутригодовых среднемноголетних значений NDVI (рис. 2) характеризует типичные для региона особенности изменений в состоянии растительного покрова посевных площадей в течение года.

Обусловлено это тем, что NDVI коррелирует с зеленой фитомассой и продуктивностью (Клещенко и др., 2011).

На основе анализа среднемноголетней внутригодовой динамики NDVI выявлен ряд следующих особенностей растительного покрова, характерных для посевных площадей Белгородской области.

1. Общая форма динамики усредненных значений индекса для всех районов Белгородской области. При этом сезонную динамику NDVI можно разделить на период роста (2 февраля – 10 июня) и период снижения (июнь – февраль).

Однообразная форма среднееголетней сезонной динамики вегетационного индекса для разных административных районов указывает на однородность сезонного развития растительного покрова посевных площадей в разных частях региона. Таким образом, особенности внутригодовой динамики индекса для посевных площадей во всех районах области аналогичны друг другу.

2. При аналогичной форме внутригодовой динамики вегетационного индекса, в районах области наблюдаются различия в их абсолютных значениях. Наиболее четко эти различия проявляются между северо-западной и юго-восточной частями региона. Причиной этого, по всей видимости, является изменение годового количества осадков, которое также меняется в этом направлении.
3. Периоды достижения максимальных и минимальных значений. Максимальные значения вегетационного индекса в каждом административном районе характерны для периода первой половины июня, что можно интерпретировать как достижение максимальных объемов зеленой фитомассы растений. Минимальные значения характерны для первой половины февраля, что, видимо, обусловлено наиболее устойчивым снежным покровом на полях в это время.
4. Влияние озимых культур на сезонную динамику индекса в осенний период. Период с начала сентября по середину октября для каждого района и для всей области характеризуется замедлением интенсивности снижения NDVI, а в отдельные годы даже непродолжительным ростом его значений, причиной чего является рост озимых культур на полях в эти сроки.

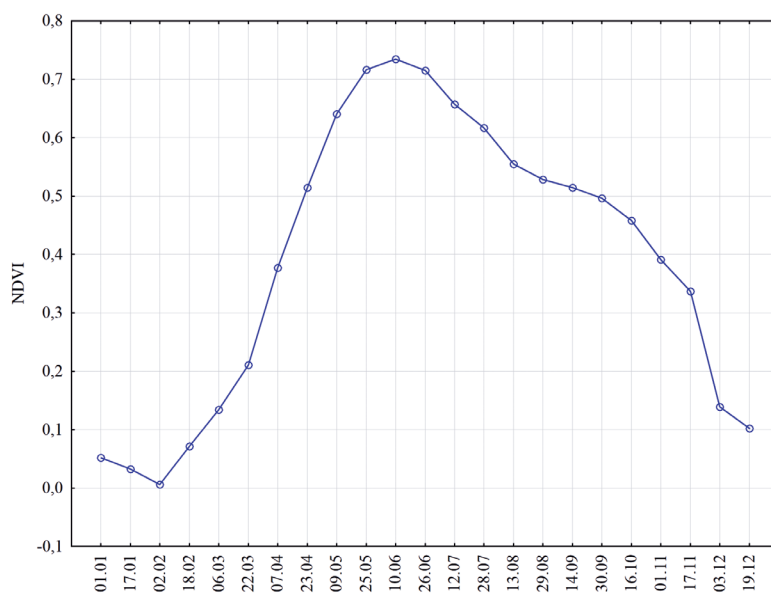


Рис. 2. Динамика сезонных значений NDVI, усредненных на каждую анализируемую дату за 15 лет с 2000 г. по 2014 г. для посевных площадей Белгородской области

Анализ ряда многолетних значений вегетационного индекса с 2000 по 2014 гг., усредненных со всех посевных площадей Белгородской области (рис. 3) с интервалом в 16 дней, подтвердил вывод о практически ежегодном осеннем замедлении в снижении значений

индекса или даже их временном росте, обусловленном повышением зеленой фитомассы озимых культур в этот период. Оценка динамики максимальных годовых значений NDVI показала, что они варьируют в диапазоне 0,70–0,78.

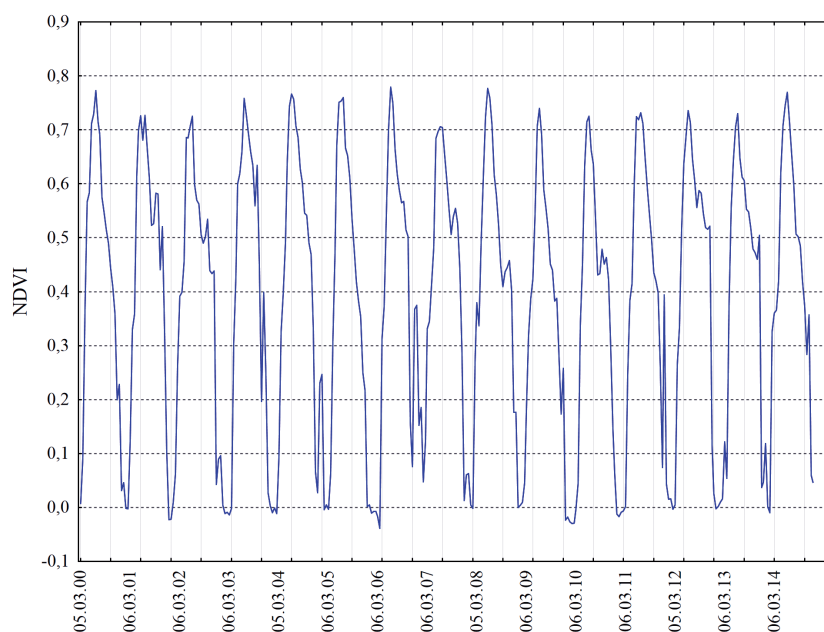


Рис. 3. Многолетняя динамика NDVI в 2000–2014 гг. для посевных площадей Белгородской области

Исследуемый период времени в 15 лет не является настолько большим, чтобы дать возможность уверенно проанализировать наличие цикличности в динамике вегетационного индекса (кроме безусловной годовой цикличности). Отсутствие снимков, аналогичных одновременно по пространственному, радиометрическому и временному разрешению аппаратуре MODIS за время до 2000 г., не позволяет провести аналогичное по точности исследование. Пространственное разрешение близких по регулярности получения снимков NOAA (AVHRR) составляет 1090 м, что недостаточно для анализа значений NDVI и, соответственно, растительного покрова даже очень больших по размеру посевных площадей.

В то же время необходимо отметить, что исследование ряда многолетних значений NDVI с применением одномерного анализа Фурье и изучение периодограммы, построенной на основе значений индекса с 2000 по 2014 гг., позволили сделать предположение о наличии цикличности в значениях NDVI через 7 лет. Однако достоверно получить ответ этот вопрос можно будет только после накопления архива изображений с сенсора MODIS за период в несколько десятилетий.

Анализ динамики среднегодовых значений NDVI, усредненных для посевных площадей Белгородской области, подтвердил, что за период 2000–2010 гг. наблюдалась тенденция к некоторому снижению значений индекса (рис. 4), при том, что между отдельными годами (например, между 2008 и 2009 гг.) различия в значениях индекса могут быть очень существенными.

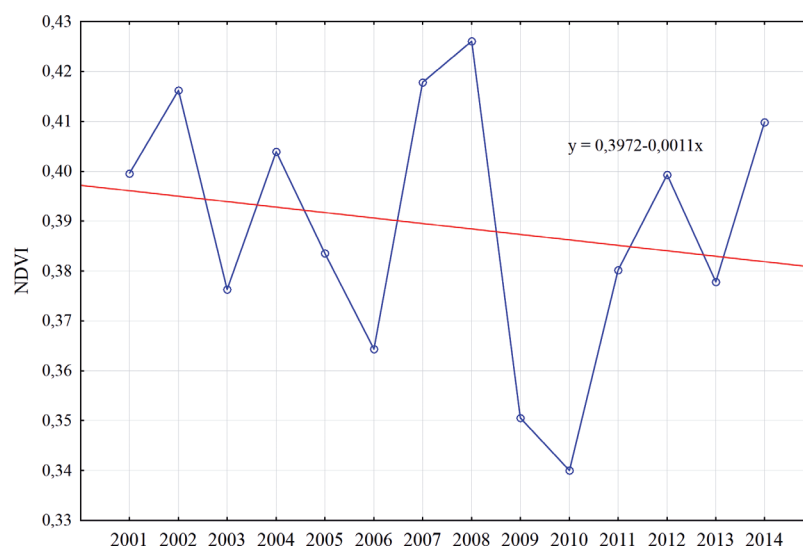


Рис. 4. Динамика среднегодового значения NDVI для посевных площадей Белгородской области в 2001–2014 гг.

Подобная динамика среднегодовых значений NDVI может являться следствием аграрного использования территории, т.к. повышенная доля полей с активной растущей растительностью на протяжении года обуславливает рост значений индекса. В свою очередь, соотношение посевных площадей с активно растущей растительностью и без нее в значительной степени является следствием особенностей структуры посевных площадей, которая определяется человеком. С другой стороны, на значения вегетационного индекса воздействуют и природные факторы (например, количество осадков). Их влияние должно проявляться и на внутригодовой динамике индекса. Из графика на рис. 4 видно, что наименьшее среднегодовое значение индекса для посевных площадей региона наблюдалось в 2010 году, т.е. в наиболее сухой год за весь анализируемый период, когда засушливое лето оказало значительное негативное влияние на развитие посевов.

В связи с тем, что на среднегодовые показания вегетационного индекса влияет и снежный покров, для исключения его воздействия была проведена оценка значений, рассчитанных только за бесснежный период (апрель – ноябрь). Однако анализ многолетней динамики значений NDVI, вычисленных таким способом, также показал аналогичную тенденцию к снижению среднегодовых величин индекса.

Выводы

Проанализирована многолетняя динамика значений вегетационного индекса NDVI для посевных площадей Белгородской области в период 2000–2014 гг. Установлено, что для всех районов Белгородской области характерна общая форма внутригодовой динамики индекса, что указывает на однородность аграрного использования их посевных площадей на протяжении года. При этом выявлены различия в абсолютных среднемноголетних максимальных и средних районных значениях индекса. Для посевных площадей, располо-

женных в западных районах области, характерны более высокие среднемноголетние максимальные значения индекса, чем для посевных площадей, расположенных в ее восточной и юго-восточной части. Максимальные значения вегетационного индекса в каждом районе области достигаются в период первой половины июня, что можно интерпретировать как достижение максимальных объемов зеленой фитомассы растений. Минимальные внутригодовые значения NDVI достигаются в первой половине февраля, что, по всей видимости, обусловлено наиболее устойчивым снежным покровом на полях в это время. В осенний период на динамику значений индекса заметное влияние оказывает интенсивный рост озимых культур. За период 2001–2010 гг. для посевных площадей наблюдалась тенденция к некоторому снижению среднегодовых значений NDVI.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации № 5.78.2014/К.

Литература

1. Брыскин В.М. Применение адаптированной модели биопродуктивности EPIC и космоснимков MODIS для прогнозирования урожайности зерновых на территории Западной Сибири // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2007. Т. 5. Вып. 2. С. 20–26.
2. Гунин П.Д., Золотокрылин А.И., Виноградова В.В., Бажа С.Н. Динамика состояния растительного покрова Южной Монголии по данным NDVI // Аридные экосистемы. 2004. Т. 10. № 24–25. С. 29–35.
3. Золотокрылин А.Н., Коняев К.В., Титкова Т.Б. Зависимость между аномалиями индекса вегетации и месячных сумм осадков в зоне умеренного и недостаточного увлажнения // Исследование Земли из космоса. 2000. № 6. С. 74–78.
4. Клещенко А.Д., Савицкая О.В. Технология ежедекадной оценки урожайности зерновых культур по спутниковой и наземной агрометеорологической информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 178–182.
5. Нильсон Т.А., Антон Я.А., Аппей В.Б. Сезонный ход коэффициентов спектральной яркости ячменя и ржи // Исследование Земли из космоса. 1983. № 5. С. 72–80.
6. Пугачева И.Ю., Шевырногов А.П. Изучение динамики NDVI посевов сельскохозяйственных культур на территории Красноярского края и республики Хакасия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 2. С. 347–351.
7. Савин И.Ю., Лупян Е.А., Барталев С.А. Оперативный спутниковый мониторинг состояния посевов сельскохозяйственных культур в России // Геоматика. 2011. № 2. С. 69–76.
8. Сидько А.Ф., Шевырногов А.П. Спектральная яркость растений, как основа дистанционной диагностики посевов сельскохозяйственных культур // Доклады Академии Наук. 1997. Т. 354. № 1. С. 120–122.
9. Спивак Л.Ф., Терехов А.Г., Витковская И.С., Батырбаева М.Ж. Использование многолетних спутниковых данных различного разрешения для комплексной оценки состояния растительного покрова территории Казахстана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т. 2. С. 450–458.
10. Терехин Э.А. Информативность спектральных вегетационных индексов для дешифрирования сельскохозяйственной растительности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 243–248.
11. Терехов А.Г. Эмпирические зависимости между элементами продуктивности яровой пшеницы северного Казахстана и спектральными характеристиками полей по данным EOS MODIS в сезонах 2005–2009 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 305–314.
12. Тронин А.А., Киселев А.В. Анализ длинных рядов вегетационного индекса территории Российской Федерации и регионов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 108–113.
13. Тулохонов А.К., Цыдыпов Б.З., Волошин А.Л., Батуева Д.Ж., Чимэддорж Ц. Пространственно-временные характеристики растительного покрова аридной и семиаридной климатических зон Монголии на основе индекса вегетации NDVI // Аридные экосистемы. 2014. Т. 20. № 2 (59). С. 19–29.
14. Doraiswamy P.C., Sinclair T.R., Hollinger S., Akhmedov B., Stern A., Prueger J. Application of MODIS derived parameters for regional crop yield assessment // Remote Sensing of Environment. 2005. Vol. 97. No. 2. pp. 192–202.
15. Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC): <https://lpdaac.usgs.gov>.
16. Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m MOD13Q1. LPDAAC: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod13q1

Analysis of vegetation index long-term dynamics for crop areas

E.A. Terekhin

Belgorod State National Research University
Belgorod 308015, Russia
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

The dynamics of vegetation index NDVI for crop areas of the Belgorod Region in 2000-2014 has been investigated. Analysis of index values for 342 time slices at intervals of 16 days was performed. The results based on NDVI values computed at more than 20,000 cultivated areas of the region on the basis of the MOD13Q1 images were obtained. The index seasonal dynamics features typical of the crop areas in the region were analyzed. It was found that NDVI average annual seasonal curves for all parts of the region have approximately the same shape. Territorial differences in the average and maximum vegetation index values were identified. In the western part of the Belgorod Region, the crop areas are characterized by higher NDVI average annual values than those in the eastern part. It was found that the index seasonal dynamics is characterized by a period of continuous growth since the beginning of February to the first half of June and a period of decrease for the rest of the year. From September to November, a slowdown in the fall of index values takes place. It is due to vegetation growth in winter crop areas. A downward trend in the index annual average was revealed for 2000 to 2010. The dependence of NDVI annual average on the influence of natural and anthropogenic factors on vegetation cover was found for certain years.

Key words: NDVI, MODIS, time series, long-term dynamics, vegetation cover, crop areas

References

1. Bryskin V.M. Primeneniye adaptirovannoy modeli bioproduktivnosti EPIC i kosmosnimkov MODIS dlya prognozirovaniya urozhaynosti zernovykh na territorii Zapadnoy Sibiri (Use adapted model bioefficiency EPIC and MODIS satellite images to predict the yield of grain in Western Siberia), *Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnyye tekhnologii*, 2007, Vol. 5, No. 2, pp. 20–26.
2. Gunin P.D., Zolotokrylin A.I., Vinogradova V.V., Bazha S.N. Dinamika sostoyaniya rastitel'nogo pokrova Yuzhnoy Mongolii po dannym NDVI (The dynamics of vegetation of Southern Mongolia according NDVI), *Aridnyye ekosistemy*, 2004, Vol. 10, No. 24–25, pp. 29–35.
3. Kleshchenko A.D., Savitskaya O.V. Tekhnologiya yezhedekadnoy otsenki urozhaynosti zernovykh kul'tur po sputnikovoy i nazemnoy agrometeorologicheskoy informatsii (Technology of decade estimation of grain crops yield on satellite and ground-based agrometeorological information), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 178–182.
4. Nil'son T.A., Anton YA.A., Apley V.B. Sezonnnyy khod koeffitsiyentov spektral'noy yarkosti yachmenya i rzhi (Seasonal variation coefficients of the spectral brightness of barley and rye), *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 1983, No. 5, pp. 72–80.
5. Pugacheva I.Yu., Shevyrnogov A.P. Izucheniye dinamiki NDVI posevov sel'skokhozyaystvennykh kul'tur na territorii Krasnoyarskogo kraya i respubliki Khakassiya (Studying the dynamics of NDVI of agricultural crops in the Krasnoyarsk Territory and the Republic of Khakassia), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 5, No. 2, pp. 347–351.
6. Savin I.Yu., Lupyan Ye.A., Bartalev S.A. Operativnyy sputnikovyy monitoring sostoyaniya posevov sel'skokhozyaystvennykh kul'tur v Rossii (Operational satellite monitoring of agricultural crops in Russia), *Geomatika*, 2011, No. 2, pp. 69–76.
7. Sid'ko A.F., Shevyrnogov A.P. Spektral'naya yarkost' rasteniy, kak osnova distantsionnoy diagnostiki posevov sel'skokhozyaystvennykh kul'tur (Spectral brightness of plants as the basis for remote diagnostics of crops), *Doklady Akademii Nauk*, 1997, Vol. 354, No. 1, pp. 120–122.
8. Spivak L.F., Terekhov A.G., Vitkovskaya I.S., Batyrbayeva M.Zh. Ispol'zovaniye mnogoletnikh sputnikovyykh dannyykh razlichnogo razresheniya dlya kompleksnoy otsenki sostoyaniya rastitel'nogo pokrova territorii Kazakhstana (The use of long-term satellite data of different resolution for a comprehensive assessment of the state of vegetation in Kazakhstan), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vyp. 6, Vol. 2, pp. 450–458.
9. Terekhin E.A. Informativnost' spektral'nykh vegetatsionnykh indeksov dlya deshifirovaniya sel'skokhozyaystvennoy rastitel'nosti (The efficiency of spectral indices for interpretation agricultural vegetation), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 4, pp. 243–248.
10. Terekhov A.G. Empiricheskiye zavisimosti mezhdru elementami produktivnosti yarovoy pshenitsy severnogo Kazakhstana i spektral'nymi kharakteristikami poley po dannym EOS MODIS v sezonakh 2005–2009 (The empirical relationship between the elements of productivity of spring wheat in northern Kazakhstan and the spectral characteristics of fields according to EOS MODIS in the seasons 2005–2009), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 3, pp. 305–314.

11. Tronin A.A., Kiselev A.V. Analiz dlennykh ryadov vegetatsionnogo indeksa territorii Rossiyskoy Federatsii i regionov (An analysis of long series of vegetation index in the Russian Federation and regions), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 108–113.
12. Tulokhonov A.K., Tsydygov B.Z., Voloshin A.L., Batuyeva D. Z.H., Chimeddorzh Ts. Prostranstvenno-vremennyye kharakteristiki rastitel'nogo pokrova aridnoy i semiaridnoy klimaticheskikh zon Mongolii na osnove indeksa vegetatsii NDVI (Spatial and temporal characteristics of vegetation in arid and semi-arid climatic zones of Mongolia based on vegetation index NDVI), *Aridnyye ekosistemy*, 2014, Vol. 20, No. 2 (59), pp. 19–29.
13. Zolotokrylin A.N. Konyayev K.V., Titkova T.B. Zavisimost' mezhdru anomaliyami indeksa vegetatsii i mesyachnykh summ osadkov v zone umerennogo i nedostatochnogo uvlazhneniya (Relationship between vegetation index anomalies and monthly precipitation in temperate and insufficient moisture), *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2000, No. 6, pp. 74–78.
14. Doraiswamy P.C., Sinclair T.R., Hollinger S., Akhmedov B., Stern A., Prueger. J. Application of MODIS derived parameters for regional crop yield assessment, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 97, No. 2, pp. 192–202.
15. Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC): <https://lpdaac.usgs.gov>.
16. Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m MOD13Q1. LPDAAC: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod13q1.