

Анализ сезонной динамики вегетационного индекса NDVI и отражательных свойств посевов кукурузы на территории Белгородской области

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*

Приведены результаты исследования динамики значений вегетационного индекса NDVI для посевов кукурузы, выращиваемой на территории Белгородской области. Значения NDVI изучены на основе данных MOD13Q1, получаемых на основе снимков MODIS с интервалом в 16 дней. Сезонные значения вегетационного индекса изучены в период с 5 марта по 2 декабря 2012 г. на основе данных со 150 сельскохозяйственных полей. Исследование показало, что максимальные значения индекса для кукурузы на территории региона характерны в период конца июня-первой половины июля. В эти же сроки значения индекса для кукурузы характеризуются наименьшим разбросом вокруг среднего значения на протяжении всего периода вегетационной активности. Установлено, что поля с кукурузой, отличающиеся по срокам проведения посевных работ, существенно различаются по значениям NDVI до начала-первой половины июля. Анализ спектрально-отражательных свойств посевов кукурузы по снимкам Landsat ETM+ показал, что на территории Белгородской области в первой половине июля спектральные характеристики кукурузы максимально отличаются от спектральных характеристик других культур в ближней и средней инфракрасной области спектра. К концу июля подобных различий уже не наблюдается.

Ключевые слова: кукуруза, спутниковые снимки, NDVI, Landsat ETM+, MODIS, Белгородская область.

Введение

Кукуруза является одной из основных сельскохозяйственных культур, выращиваемых на территории Белгородской области и Центрального Черноземья. В 2012 г. посевы кукурузы в области составили 141 000 га, что составляет более 10% всех посевных площадей региона (Департамент АПК, 2012а). Посевы кукурузы на территории области подразделяются на два типа: кукуруза на зерно и кукуруза на силос. В Белгородской области кукуруза высевается весной, когда почва уже в определенной степени прогрелась, но еще сохраняет значительные запасы влаги. Сев кукурузы начинается при достижении среднесуточной температуры воздуха $+10^{\circ}$ - $+12^{\circ}$. Такой период наступает в первой декаде мая. При ранней теплой весне возможен сев кукурузы в более ранние сроки и, наоборот. До конца мая – начала июня спектральные свойства полей с кукурузой во многом идентичны отражательным свойствам оголенной почвы, т.к. посевы еще не взошли, либо только начинают формировать фитомассу и проективное покрытие, что отражается на их отображении, на космических снимках.

Исследования по применению спутниковых данных для анализа посевов культур развиваются с 80-х годов прошлого века и постоянно совершенствуются по мере появле-

ния новых типов спутниковых данных и подходов к их обработке (Bach, 1998). Современные подходы к дистанционному изучению сельскохозяйственных культур, включая кукурузу, сконцентрированы на применении спектральных характеристик для картографирования и анализа параметров посевов (Барталев, 2005; Sibley, 2014), моделировании продукционного процесса кукурузы (Клещенко, 2012; Gitelson, 2012; Леонтьев, 2013), применении спектральных индексов для анализа характеристик сельскохозяйственной растительности (Жукова, 2012; Терехин, 2012).

Создание системы мониторинга посевов для конкретных регионов требует изучения особенностей спектральных характеристик сельскохозяйственных культур с целью разработки подходов по их применению для анализа состояния растительности, что определяет актуальность настоящего исследования. При этом разработка перспективных подходов по дистанционному изучению посевов является одним из компонентов, повышающих эффективность мониторинга посевов сельскохозяйственных культур, в особенности, на территории Центрально-Черноземного региона, играющего важную роль в сельскохозяйственном производстве России.

Материалы и методика исследования

Экспериментальная часть исследования заключалась в анализе сезонного изменения значений вегетационного индекса NDVI кукурузы, выращиваемой на территории Белгородской области, на основе продуктов MOD13Q1 (LPDAAC, 2012). Индекс NDVI рассчитывается на основе коэффициентов отражения в красной и ближней инфракрасной зонах спектра, информативных для анализа растительности.

Продукты MOD13Q1 создаются на основе ежедневно получаемых многозональных снимков MODIS и представляют значения спектральных характеристик, усредненные за 16 дней. Для создания продуктов MOD13Q1 применяются атмосферно и радиометрически откорректированные снимки MODIS, что позволяет анализировать спектральные индексы за разные даты. Значения спектрального индекса NDVI были получены на основе продуктов MOD13Q1 с интервалом в 16 дней на период с 5 марта по 2 декабря 2012 г.

Для достоверного анализа значений вегетационного индекса на территории Белгородской области было отобрано и исследовано 150 полей, общей площадью 7256 га на которых располагались посевы кукурузы в 2012 г. Средняя площадь анализируемого поля составила 48,4 га. Тестовые поля располагались в различных частях Белгородской области, в ее пяти административных районах (Краснояржский, Белгородский, Чернянский, Новооскольский, Ивнянский).

Для каждого из исследуемых полей была построена и проанализирована кривая сезонного изменения значений спектрального индекса. После этого были проанализированы усредненные значения NDVI на каждую дату со всех полей.

На основе снимков Landsat ETM+ (пространственное разрешение 15-30 м) было проведено изучение сезонных спектрально-отражательных свойств посевов кукурузы в различных комбинациях каналов, в первую очередь, в комбинациях 7-5-3 (2,09-2,35 мкм, 1,55-1,75 мкм, 0,63-0,69 мкм) и 4-3-2 (0,75-0,90 мкм, 0,63-0,69 мкм, 0,52-0,60 мкм). Для этой цели были задействованы изображения на разные даты вегетационного периода с мая по октябрь 2012 г.: 4 мая, 14 июля, 30 июля, 8 августа, 10 октября. В системе координат WRS-2, определяющей расположение сцен Landsat на земной поверхности, были использованы сцены со следующими координатами: Path (колонка) 177, Row (ряд) 025 и Path 176, Row 25, охватывающие основную часть Белгородской области.

Результаты и их обсуждение

Анализ характеристик значений NDVI на каждую анализируемую дату (*табл. 1, рис. 1*) позволил проследить изменение значений NDVI посевов кукурузы на территории Белгородской области на протяжении вегетационного периода и косвенно оценить возможность применения сезонных значений индекса для детектирования посевов кукурузы.

Таблица 1. Статистические характеристики выборки значений индекса NDVI для анализируемых полей с кукурузой (значения индекса умножены на 10000)

<i>Дата</i>	<i>Среднее</i>	<i>Минимум</i>	<i>Максимум</i>	<i>Стандартное отклонение</i>
5 марта	90	-98	347	93
21 марта	2723	865	5732	877
6 апреля	3224	2645	4921	373
22 апреля	4781	3093	6679	729
8 мая	6036	4044	8069	817
24 мая	6890	3855	8181	869
9 июня	7668	5999	8680	632
25 июня	7950	6593	8476	363
11 июля	7889	6462	8523	346
27 июля	7530	6004	8274	391
12 августа	6437	4471	8014	795
28 августа	6008	4029	7676	750
13 сентября	5892	4204	7486	664
29 сентября	5095	3577	6935	738
15 октября	4714	2672	7431	967
31 октября	4680	2911	7780	868
16 ноября	4814	2824	8039	1062
2 декабря	360	-397	6221	1035

Значения индекса, представляющего безразмерную величину, были умножены на 10000 для удобства анализа. Из *табл. 1* видно, что за период вегетационной активности, начиная с 8 мая, наименьшие стандартные отклонение характерны для значений NDVI 25 июня и 11 июля (значения NDVI до 8 мая не учитывались, т.к. в этот период кукуруза на полях еще не взошла, либо только начинает всходить). В этот период для кукурузы также характерны максимальные значения вегетационного индекса (*рис. 1*).

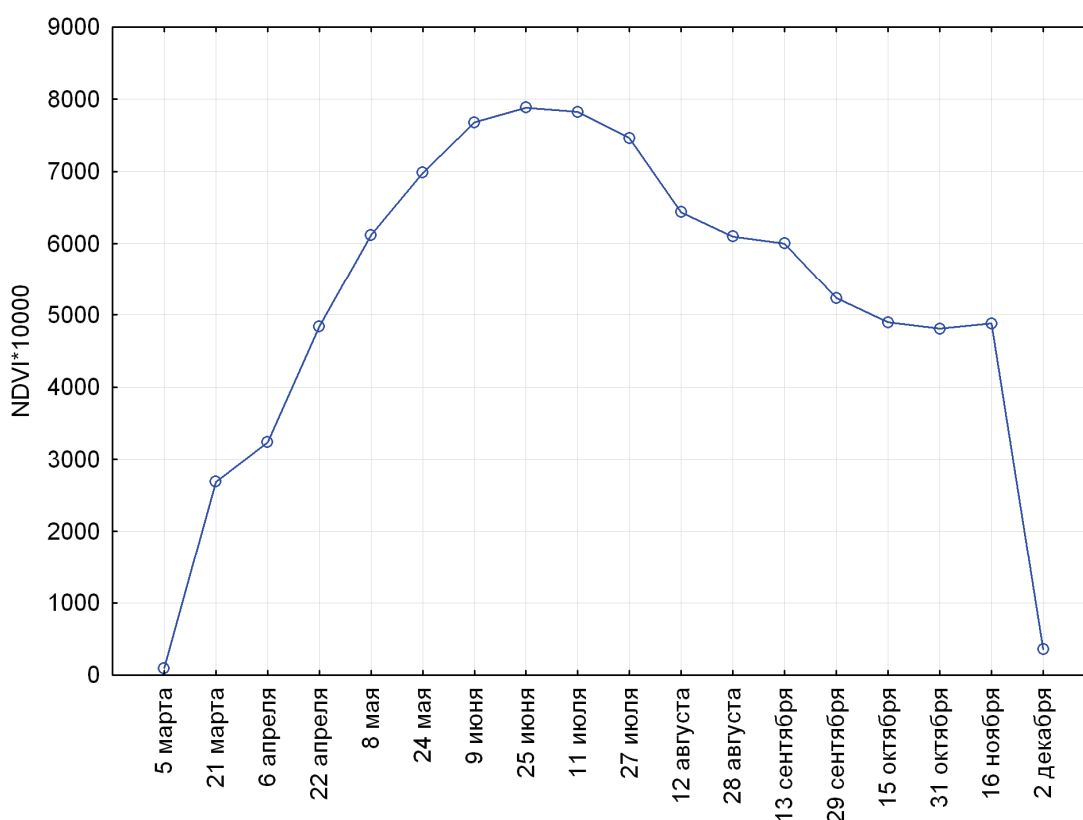


Рис. 1. График динамики средних значений NDVI для полей с кукурузой на территории Белгородской области (значения индекса на каждую дату усреднены со 150 полей)

Наименьшие стандартные отклонения в эти даты позволяют предположить, что спектральные характеристики большинства анализируемых полей с кукурузой в этот период характеризуются наибольшей однородностью. Учитывая, что индекс NDVI основан на коэффициентах отражения в красной и ближней инфракрасной зонах, можно предположить, что снимки, имеющие эти каналы, в период середины июля будут наилучшим образом подходить для экспертного детектирования посевов кукурузы. Однако окончательно ответить на этот вопрос можно, сопоставив зональные коэффициенты отражения кукурузы с коэффициентами отражения других культур в разные сроки исследования.

Необходимо отметить, что 2012 г. на территории Белгородской области характеризовался очень ранней весной. В связи с этим посевы большинства культур начались на 2-3

недели раньше обычного. На эти же сроки сдвинулась и уборка урожая (Департамент АПК, 2012б). В связи с этим достаточно высокие значения NDVI для полей с кукурузой наблюдались уже в первой половине мая. Тем не менее, даже для значений NDVI 25 июня и 11 июля характерен достаточно сильный разброс значений индекса (рис. 2).

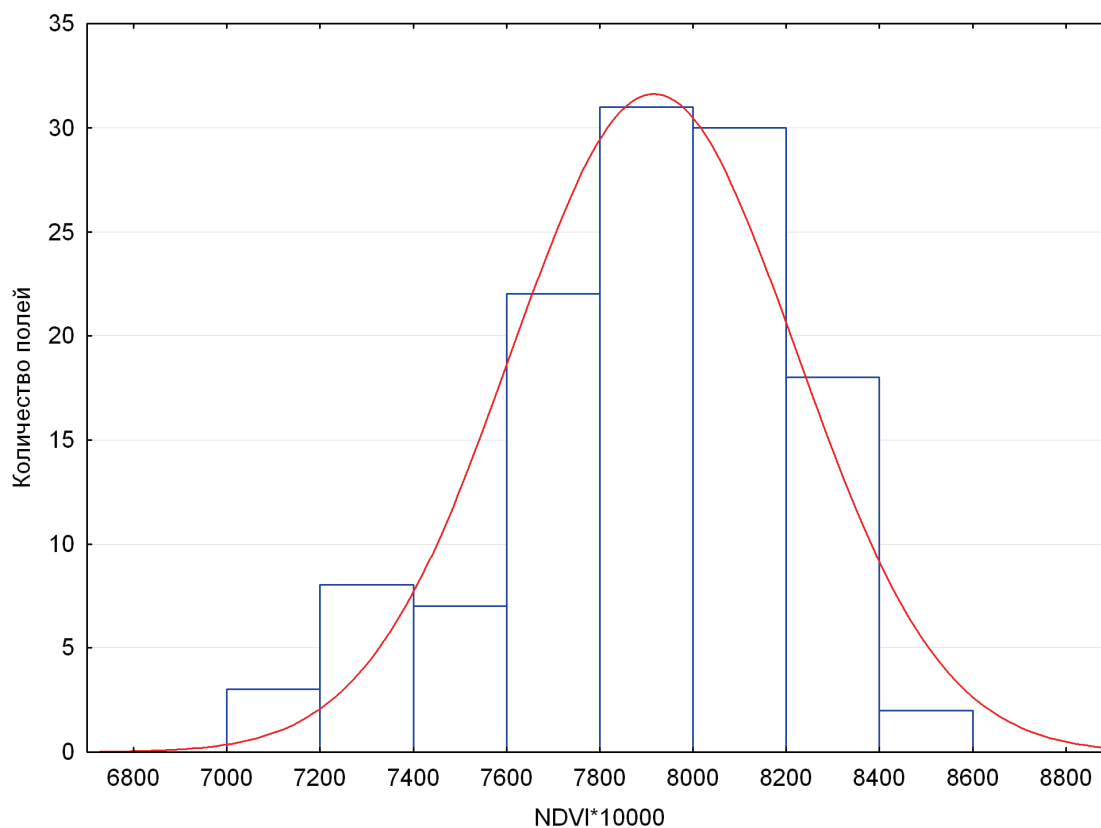


Рис. 2. Распределение полей с кукурузой по значениям NDVI на 11.07.2012

Несмотря на то, что большинство полей с кукурузой характеризуется значениями NDVI*10000 в пределах от 7600 до 8400, ряд полей имеют значения ниже, чем 7600 и более, чем 8400. Это свидетельствует о том, что даже в эти сроки, характеризующиеся минимальным разбросом показаний индекса вокруг среднего значения (табл. 1), имеется определенное количество полей со значениями индекса, существенно меньшими или большими его среднего показателя. Это будет снижать эффективность детектирования полей с кукурузой на основе сезонных значений индекса NDVI, т.к. другие культуры, выращиваемые на территории Белгородской области, в этот период часто имеют аналогичные значения индекса (Терехин, 2013). Значительный разброс значений индекса для сельскохозяйственных полей с одной и той же культурой на отдельные даты может быть обусловлен различиями в сроках проведения посевных работ. В связи с этим на разных полях наблюдаются различия в сроках развития посевов и, соответственно, в значениях спектрального индекса (рис. 3).

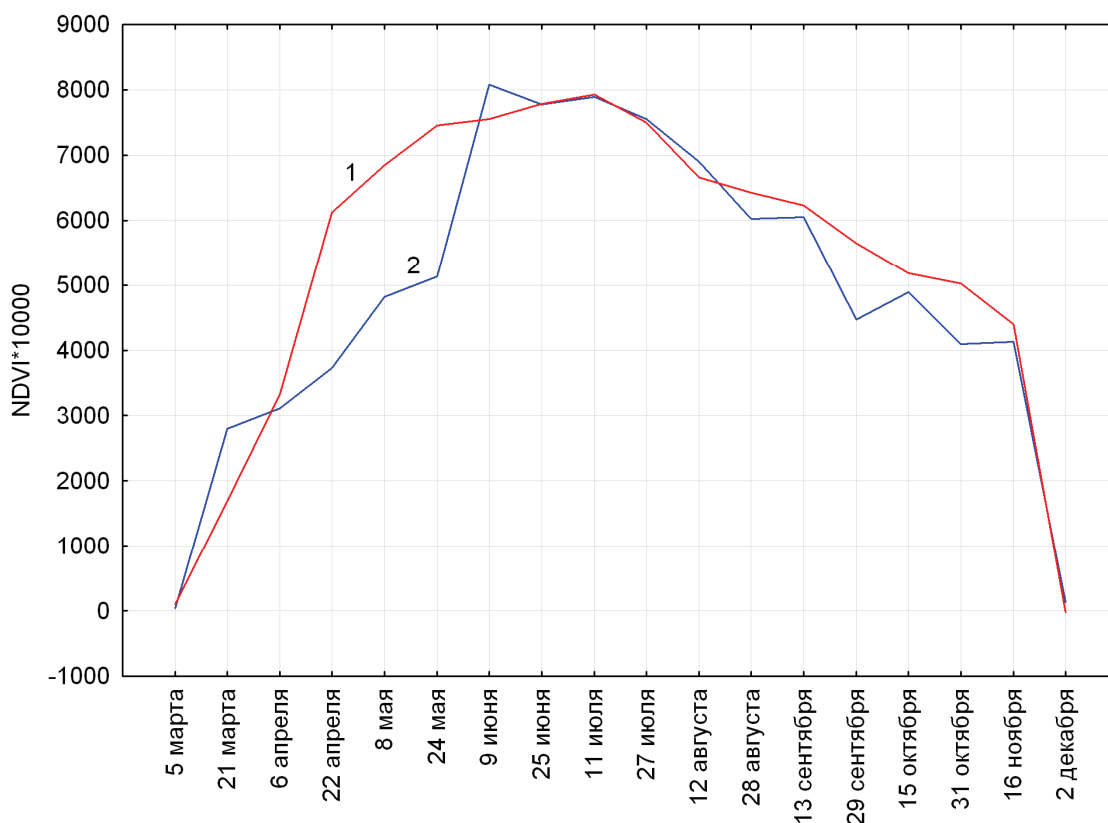


Рис. 3. Графики динамики значений NDVI полей с кукурузой, различающихся по срокам проведения посевных работ (Краснояржуский район). 1-ранний срок, 2-поздний срок

Таким образом, можно констатировать, что для территории Белгородской области большинство полей с кукурузой в середине июля характеризуется максимальными значениями индекса NDVI с наименьшим разбросом. Однако, сезонные значения NDVI, вычисленные на основе продуктов MOD13Q1, не могут быть эффективно использованы для надежного выявления полей с кукурузой.

Анализ разновременных снимков Landsat ETM+ и кривых спектральной яркости кукурузы и других культур (рис. 4, 5, 6) показал, что в середине июля посевы кукурузы по спектральным характеристикам наилучшим образом отличаются от остальных типов посевов.

Установлено, что 14 июля кукуруза существенно отличалась от остальных культур в ближней и средней инфракрасной зонах спектра (1,4-2,4 мкм) (рис. 5). При этом уже 30 июля таких контрастных отличий не наблюдалось (рис. 6). Из рис. 5 и 6 также видно, что за период между 14 и 30 июля (т.е. между серединой и концом месяца) форма кривой спектральной яркости для полей с кукурузой существенно не изменилась. Кривые спектральной яркости для полей с соей и подсолнечником претерпели заметные изменения в ближней инфракрасной зоне спектра, для пшеницы озимой - в видимой зоне спектра (0,4-0,7 мкм).

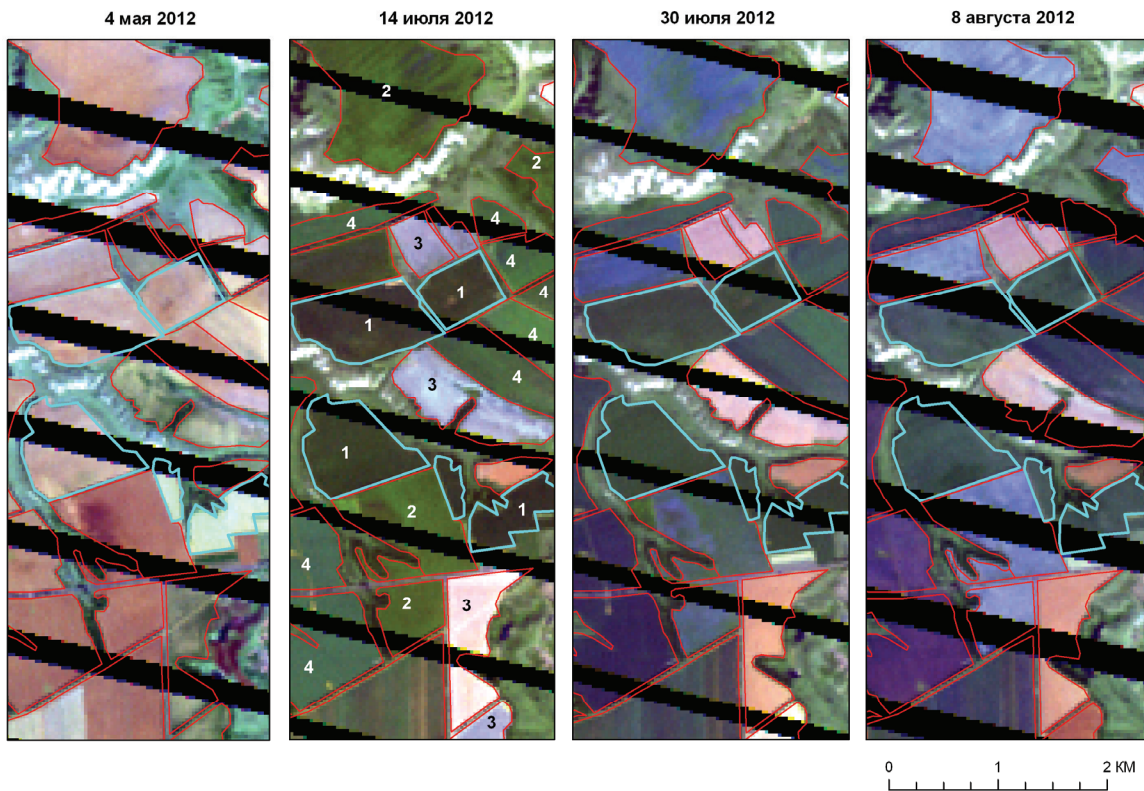


Рис. 4. Отображение полей с кукурузой на снимках Landsat ETM+ (комбинация каналов 7-5-3) на фоне других типов посевов в разные сроки вегетационного сезона. 1-кукуруза, 2-соя, 3-озимая пшеница, 4-подсолнечник

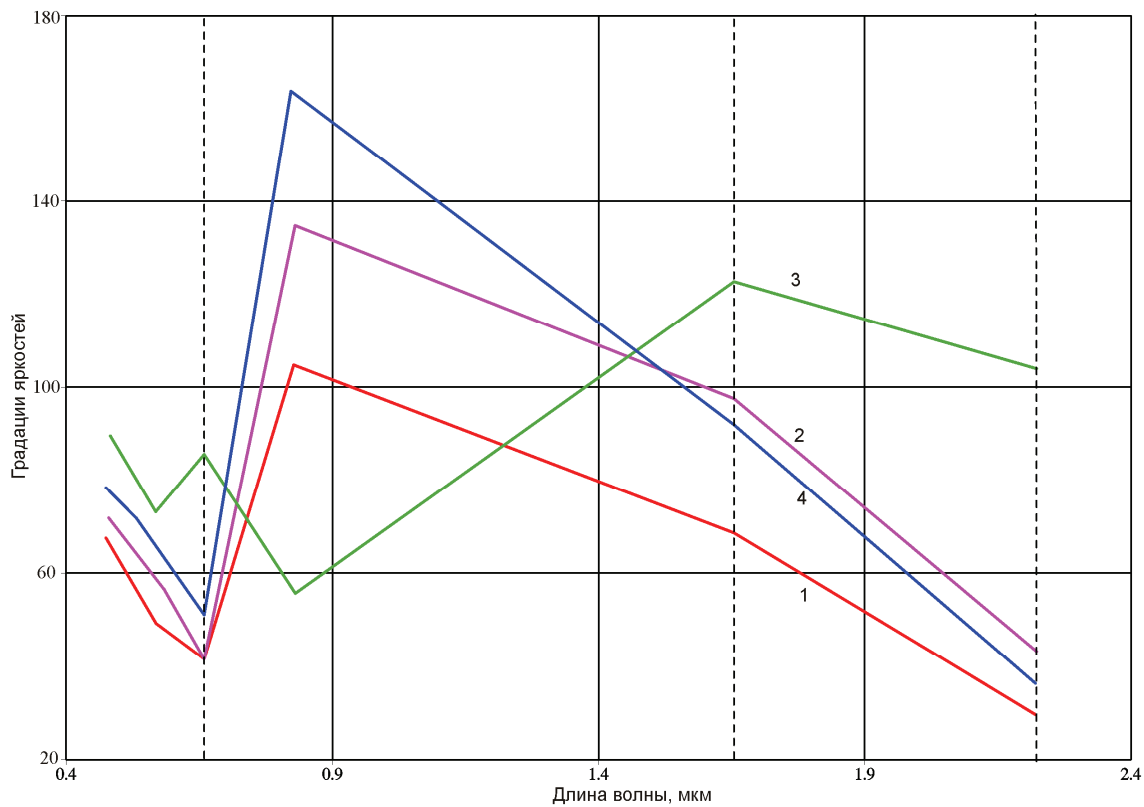


Рис. 5. Кривые спектральной яркости агрокультур 14.07.2012. 1-кукуруза, 2-соя, 3-озимая пшеница, 4-подсолнечник. Пунктирные линии (слева-направо) – середины длин волн 3,5,7-го каналов Landsat-7 (0,63-0,69 мкм, 1,55-1,75 мкм, 2,09-2,35 мкм)

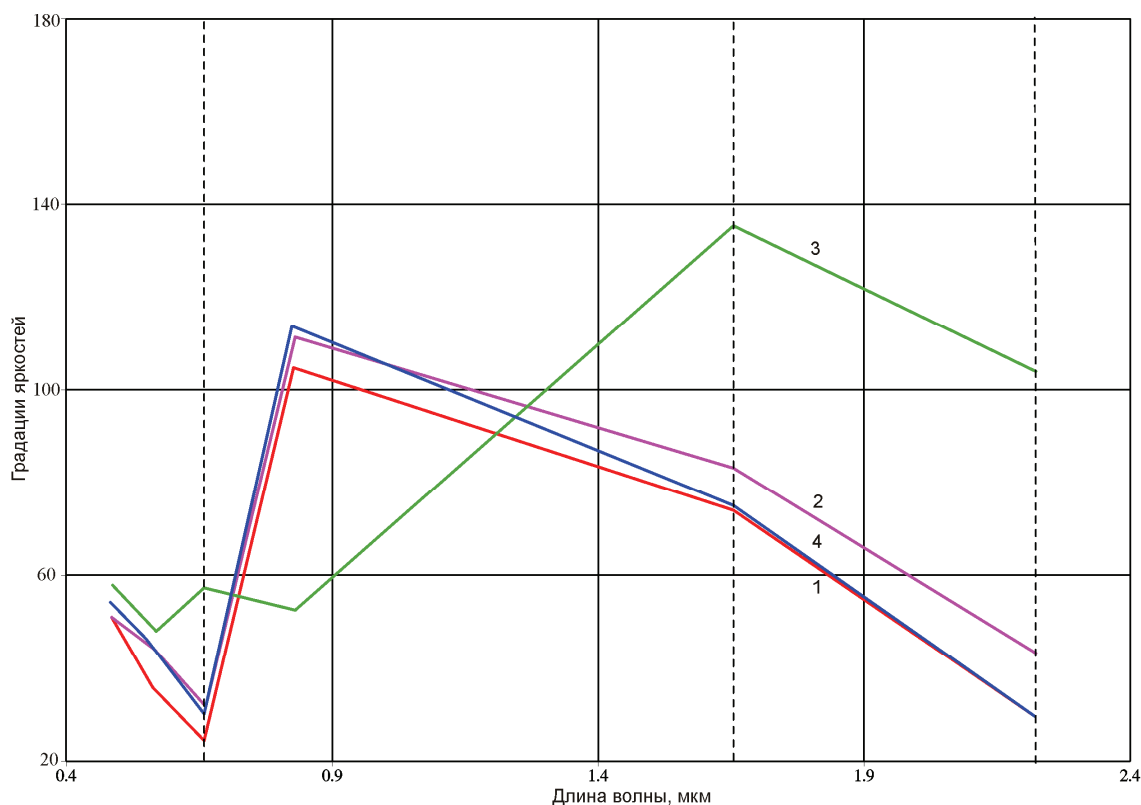


Рис. 6. Кривые спектральной яркости агрокультур 30.07.2012. 1-кукуруза, 2-соя, 3-озимая пшеница, 4-подсолнечник. Пунктирные линии (слева–направо) – середины длин волн 3,5,7-го каналов Landsat-7 (0,63-0,69 мкм, 1,55-1,75 мкм 2,09-2,35 мкм)

Анализ сезонного развития спектра полей с кукурузой (рис. 1) показал, что в середине августа для полей с кукурузой характерны такие же значения NDVI, как в середине мая. Изучение динамики значений NDVI конкретных полей позволило получить информацию о развитии посевов на протяжении вегетационного сезона, т.к. индекс NDVI тесно коррелирует с рядом биофизических параметров, таких как объем зеленой фитомассы, продуктивность. Установлено, что значения NDVI меньше, чем 0,3 (в нашем случае – 3000), соответствуют оголенной почве, увеличение значений индекса характеризует рост зеленой фитомассы, уменьшение – ее падение, т.е. степень созревания посевов.

Выводы

Сезонная динамика значений спектрального индекса NDVI для посевов кукурузы на территории Белгородской области характеризуется тем, что максимальные значения индекса характерны в период конца июня - первой половины июля (25 июня - 11 июля). В эти же сроки для посевов кукурузы характерны минимальные разбросы значений вокруг среднего и минимальные стандартные отклонения. Тем не менее, анализ значений индекса, полученных на основе продуктов MOD13Q1, показал, что они не могут эффективно использоваться

для детектирования посевов кукурузы по причине их близости со значениями NDVI других типов посевов. Анализ кривых спектральной яркости посевов кукурузы, полученных на основе снимков Landsat ETM+, показал, что в сроки середины июля поля с кукурузой на основе кривых спектральной яркости наиболее контрастно отличаются от других сельскохозяйственных полей. В конце июля эти отличия уже нивелируются.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта на проведение научно-исследовательских работ по приоритетным направлениям социально-экономического развития Белгородской области (договор № Г-03 от 10.11.2013 г.).

Литература

1. *Барталев С.А., Луян Е.А., Нейштадт И.А., Савин И.Ю.* Дистанционная оценка параметров сельскохозяйственных земель по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2. № 2. С. 228-236.
2. Департамент агропромышленного комплекса Белгородской области: <http://belaprk.ru>.
3. Департамент агропромышленного комплекса Белгородской области: Уборка урожая 2012: http://belaprk.ru/events/uborochnaya_k_neozhidannostyam_gotovy.
4. *Жукова Е.Ю., Белоусова Е.А., Мусихина М.О., Сысоева Ю.В.* Характеристика агроценозов Койбальской степи республики Хакасия // Вестник Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова. 2012. № 2. С. 9-11.
5. *Клещенко А.Д., Найдина Т.А., Гончарова Т.А.* Использование данных дистанционного зондирования для моделирования продукционного процесса кукурузы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 259-268.
6. *Леонтьев А.А.* Система спутникового мониторинга состояния полей и прогнозирования урожайности // Геоматика. 2013. № 2. С. 77-79.
7. *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.
8. *Терехин Э.А.* Анализ спектральных свойств сельскохозяйственной растительности Белгородской области по спутниковым данным MODIS // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: естественные науки. 2013. №10 (153). вып. 23. С. 150-156.
9. Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). <https://lpdaac.usgs.gov>.
10. *Bach H.* Yield estimation of corn based on multitemporal LANDSAT-TM data as input for an agrometeorological model // Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A. 1998. Vol. 7. No. 4. P. 809-825.
11. *Gitelson A.A., Peng Y., Masek J.G., Rundquist D.C., Verma S., Suyker A., Baker J.M., Hatfield J.L., Meyers T.* Remote estimation of crop gross primary production with Landsat data // Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 121. P. 404-414.
12. *Sibley A. M., Grassini P., Thomas N. E., Cassman K.G., Lobell D.* Testing Remote Sensing Approaches for Assessing Yield Variability among Maize fields // Agronomy Journal. 2014. Vol. 106. No. 1. P. 24-32.

Analysis of the seasonal dynamics of NDVI index and the reflective properties of corn in the Belgorod Region

E.A. Terekhin

*Belgorod State National Research University
Federal and Regional Centre for Aerospace Monitoring of Natural Resources
Belgorod 308015, Russia
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru*

The results of studies of the dynamics of spectral index NDVI for crops of corn grown in the Belgorod region are presented. NDVI values based on the MOD13Q1 obtained on the basis of MODIS data at intervals of 16 days were studied. Seasonal values of the spectral index in the period from March 5 to December 2, 2012 on the basis of data from 150 agricultural fields were analyzed. The study showed that the maximum value of the index for corn in the region is characterized by a period of the end of June and the first half of July. In the same period, the index values for corn are the least spread around the mean value for the entire period of vegetation. It is established that the fields with corn differing in terms of the sowing season, differ significantly by the values NDVI till the beginning / the first half of July. Analysis of the spectral reflection properties of corn from Landsat ETM+ data shows that in the Belgorod region in the first half of July, the spectral characteristics of corn are maximally different from the spectral characteristics of other cultures in the near and mid-infrared ranges. By the end of July, such differences are not observed.

Keywords: corn, remote sensing data, NDVI, Landsat ETM+, MODIS, Belgorod region.

References

1. Bartalev S.A., Lupyan E.A., Neyshtadt I.A., Savin I.Y. Distantionnaya otsenka parametrov sel'skokhozyaystvennykh zemel' po sputnikovym dannym spektroradiometra MODIS (Remote parameter estimation of agricultural land based on satellite data spectroradiometer MODIS), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Vol. 2, No. 2, pp. 228-236.
2. <http://belapk.ru>.
3. http://belapk.ru/events/uborochnaya_k_neozhidannostyam_gotovy.
4. Zhukova Y.Y., Belousova E.A., Musikhina M.O., Sysoyeva J.V. Kharakteristika agrotsenozov Koybal'skoy stepi respubliki Khakasiya (Characteristics of Agrocenoses of Koybalskaya Steppe in the Republic of Khakasia), *Vestnik Khakasskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.F. Katanova*, 2012, No. 2, pp. 9-11.
5. Kleshchenko A.D., Naidina T.A., Goncharova T.A. Ispol'zovaniye dannykh distantsionnogo zondirovaniya dlya modelirovaniya produktsionnogo protsessa kukuruzy (Use of remotely-sensed data for modeling crop production of maize), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 259-268.
6. Leontyev A.A. Sistema sputnikovogo monitoringa sostoyaniya poley i prognozirovaniya urozhaynosti (Satellite monitoring system status fields and forecasting yields), *Geomatika*, 2013, No. 2, pp. 77-79.
7. Terekhin E.A. Informativnost' spektral'nykh vegetatsionnykh indeksov dlya deshifirovaniya sel'skokhozyaystvennoy rastitel'nosti (The efficiency of spectral indices for interpretation agricultural vegetation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 4, pp. 243-248.
8. Terekhin E.A. Analiz spektral'nykh svoystv sel'skokhozyaystvennoy rastitel'nosti Belgorodskoy oblasti po sputnikovym dannym MODIS (Analysis of the spectral properties of agricultural vegetation Belgorod region on MODIS satellite data), *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: yestestvennyye nauki*, 2013, No. 10 (153), Issue 23, pp. 150-156.
9. <https://lpdaac.usgs.gov>.
10. Bach H. Yield estimation of corn based on multitemporal LANDSAT-TM data as input for an agrometeorological model, *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A*, 1998, Vol. 7, No. 4, pp. 809-825.
11. Gitelson A.A., Peng Y., Masek J.G., Rundquist D.C., Verma S., Suyker A., Baker J.M., Hatfield J.L., Meyers T. Remote estimation of crop gross primary production with Landsat data, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 121, pp. 404-414.
12. Sibley A.M., Grassini P., Thomas N.E., Cassman K. G., Lobell D. Testing Remote Sensing Approaches for Assessing Yield Variability among Maize fields, *Agronomy Journal*, 2014, Vol. 106, No. 1, pp. 24-32.