

Влияние проективного покрытия растительности посевных площадей на ее спектрально-отражательные свойства

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 оценки влияния проективного покрытия растительности, типичной для посевных площадей Белгородской области и Центрального Черноземья, на значения вегетационного индекса NDVI. Оценка влияния проективного покрытия на значения спектрального показателя проведена на основе экспериментальных данных, собранных на протяжении 2012-2015 гг. в различные сроки вегетационного сезона. Установлено, что значения вегетационного индекса существенно различаются для разных классов проективного покрытия. Для посевных площадей с его высокими значениями характерны меньшие величины стандартного отклонения вегетационного индекса. На основе аналитической выборки из 184 измерений проведена количественная оценка зависимости вегетационного индекса от величины проективного покрытия. Установлено, что уравнения линейного вида достаточно достоверно описывают связь между проективным покрытием и значениями NDVI. Увеличению величины проективного покрытия соответствует рост значений вегетационного индекса. Вычисленная зависимость позволила провести оценку сезонной динамики проективного покрытия для посевных площадей Белгородской области. Показана возможность его геоинформационного картографирования на уровне отдельных обрабатываемых полей, оценки его динамики на протяжении периода активной вегетации и использования для определения состояния сельскохозяйственной растительности.

Ключевые слова: проективное покрытие, дистанционное зондирование, растительный покров, NDVI, вегетационные индексы, посевные площади, геоинформационное картографирование

*Одобрена к печати: 09.06.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-61-71*

Введение

Проективное покрытие (fraction of green vegetation cover, vegetation cover fraction, green vegetation fraction) является одним из ключевых параметров растительного покрова и характеризует степень покрытия почвы фитомассой растений. Математически проективное покрытие определяется как отношение проекции побегов и листьев к общей площади участка и выражается в долях или процентах.

С учетом того, что особенности развития растительного покрова во многом определяются зеленой фитомассой и ее динамикой, научный интерес представляет анализ проективного покрытия зелеными частями растений, т.е. анализ проективного покрытия зеленой фитомассой. Различают общее проективное покрытие (покрытие всех видов растительного сообщества) и частное проективное покрытие (покрытие отдельных видов). Для посевных площадей, растительность которых преимущественно монокультурна, общее и частное проективное покрытие совпадают.

Анализ проективного покрытия, его сезонной и многолетней динамики представляет интерес в связи с тем, что позволяет получать информацию о развитии растительного покрова и его биофизических показателях (Jiang et al., 2006; Бузук, 2013; Музылев и др., 2015). По причине того, что проективное покрытие является одним из ключевых биоме-

трических параметров, характеризующих состояние растительности, на основе анализа его сезонного изменения можно делать выводы об особенностях развития растительного покрова тех или иных посевных площадей. По величине проективного покрытия зеленой фитомассой можно судить о продуктивности растительных сообществ (Бакурова, Юфеев, 2009; Бузук, 2014).

Данные дистанционного зондирования в настоящее время получают все большее применение при оценке состояния растительного покрова и посевов сельскохозяйственных культур. К настоящему времени установлено, что анализ спектрально-отражательных свойств растительности, в частности, вегетационных индексов, представляющих алгебраические преобразования со спектральными яркостями в разных зонах спектра, может быть использован для моделирования параметров растительного покрова, включая проективное покрытие (Jiménez-Muñoz et al., 2009; Кынчева и др., 2011; Xiao et al., 2010). Оценка зависимостей между параметрами растительности и ее спектральными признаками позволяет ответить на ряд вопросов, связанных с ее сезонной и многолетней динамикой (Zhou et al., 2014; Малахов, Исламгулова, 2014).

Несмотря на то, что о сезонном развитии растительного покрова можно судить и на основе некоторых вегетационных индексов (например, EVI, PVI), рассчитываемых на базе спутниковых снимков, изучение проективного покрытия позволяет более объективно оценить состояние растительности, т.к. на вегетационные индексы может оказывать влияние сразу ряд параметров.

Применение спутниковых данных для количественной оценки проективного покрытия основывается преимущественно на вычислении эмпирических зависимостей между ним и спектральными характеристиками (Rundquist, 2002; Johnson et al., 2012). На текущий момент доказано влияние проективного покрытия на различные спектральные показатели (Carlson, Ripley, 1997; Li et al., 2005), однако по причине разнообразия растительного покрова во многом остается открытым вопрос влияния отдельных его типов на спектральный отклик (Glenn et al., 2008). Необходимо отметить, что при изучении проективного покрытия дистанционными методами имеется ряд ограничений, связанных с наличием в определенную стадию сезонного развития растительного покрова многослойного покрытия листовыми поверхностями. На этой стадии развития растительного сообщества более существенное влияние на спектральный отклик будет оказывать уже величина объема зеленой фитомассы.

Цель настоящего исследования заключалась в количественной оценке влияния проективного покрытия на спектрально-отражательные свойства (на примере вегетационного индекса NDVI) для растительности посевных площадей, типичных для Белгородской области, и оценке возможностей использования вегетационного индекса для изучения сезонного изменения проективного покрытия и его геоинформационного картографирования.

Материалы и методика исследования

Для достижения поставленной цели необходимо было решить ряд задач, связанных с формированием аналитической выборки, подбором дистанционных данных и их обработкой, проведением геоинформационного и статистического анализа.

Экспериментальные исследования были выполнены на территории Белгородской области, которая расположена преимущественно в лесостепной зоне и характеризуется интенсивным аграрным использованием. Распаханность ее территории достигает 60%, т.е. посевные площади являются наиболее распространенным компонентом в структуре ее земель. Ландшафтный рисунок и структура посевных площадей Белгородской области во многом отражают эти показатели, характерные для Центрально-Черноземного региона.

Оценка количественной связи между величиной проективного покрытия и значениями NDVI была выполнена на основе информации, собранной в процессе полевых исследований на протяжении 2012–2015 гг. с нескольких десятков посевных площадей Белгородской области, включающих основные типы сельскохозяйственных культур, выращиваемых на ее территории.

Оценку проективного покрытия проводили в различные периоды вегетационного сезона, чтобы охватить все стадии развития растительности. При этом исследование проводили на совокупности посевных площадей, включающей поля с различной степенью проективного покрытия зелеными частями растений, величина которого варьировалась от 0–2% для распаханных полей или полей с практически полным отсутствием зеленой фитомассы до 95–99% для полей с активно растущими посевами. Непосредственная оценка величины проективного покрытия проводилась путем анализа плановых наземных фотографий посевных площадей, сделанных с небольшой высоты (1 м) в наиболее типичных их участках. Фотографии, полученные таким способом, позволяют достаточно достоверно получать сведения о соотношении участков почвы, покрытых и не покрытых зеленой фитомассой. В общей сложности анализируемая выборка составила 184 измерения.

Для анализа спектральных характеристик посевных площадей, различающихся по степени проективного покрытия, были использованы информационные продукты MOD13Q1 (LP DAAC, <https://lpdaac.usgs.gov>), содержащие значения NDVI, являющегося безразмерной величиной. MOD13Q1 представляют 16-дневные композиты вегетационного индекса. Подборка информационных продуктов MOD13Q1 была осуществлена таким образом, чтобы изображения NDVI максимально соответствовали датам полевых наблюдений.

Информационные продукты, создаваемые на базе снимков MODIS, включая изображения MOD13Q1, позволяют анализировать динамику спектрально-отражательных особенностей растительного покрова с высокой частотой (несколько десятков раз на протяжении года), а также исследовать ряды многолетних значений вегетационного индекса (начиная с 2000 г.). Соответственно, индекс NDVI, рассчитываемый на основе изображений в красной и ближней инфракрасной зоне спектра, дает возможность анализиро-

вать сезонные и многолетние особенности динамично изменяющегося растительного покрова.

В то же время необходимо отметить, что пространственное разрешение информационных продуктов MOD13Q1, составляющее 250 м/пиксель, вносит существенные ограничения при анализе спектральных характеристик небольших по размеру посевных площадей, что, однако, было учтено нами в процессе выполнения исследования, т.к. малые по размеру поля были исключены из анализа.

Значения NDVI на все анализируемые даты были рассчитаны методом зональной статистики для каждой исследуемой посевной площади. Аналитические процедуры, связанные с геоинформационной обработкой данных, были проведены с применением пакета ArcGIS 10.1. Чтобы обеспечить максимально возможную точность проводимых оценок, для статистического анализа использовали значения NDVI, усредненные в границах контуров анализируемых полей, оцифрованных по снимкам высокого пространственного разрешения (2,5-5 м/пиксель). Этот же специально подготовленный нами векторный слой контуров посевных площадей региона (Терехин, 2015) позволил с высокой точностью провести геоинформационное картографирование проективного покрытия за разные сроки (на примере вегетационного периода 2015 г.).

Статистическая обработка полученной информации, проведенная в пакете STATISTICA 10, заключалась в первичном анализе данных, оценке степени влияния проективного покрытия на значения вегетационного индекса, вычислении эмпирических уравнений связи между ними и проверке их достоверности. Результаты исследования получены с применением программного обеспечения и оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием ФРЦ НИУ «БелГУ».

Результаты и их обсуждение

Анализ рядов стандартизированных значений NDVI и проективного покрытия, построенных на основе данных за все годы и сглаженных с помощью преобразований Фурье статистическими фильтрами (например, фильтром Даниэля), показал, что обе переменные изменяются практически синхронно (*рис. 1*), что, в свою очередь, может предварительно указывать на тесную связь между ними. Величина окна сглаживания была выставлена на максимальное значение (объем выборки).

Стандартное отклонение величины проективного покрытия (по всей выборке) составило 0,34 при средней величине 0,48; вегетационного индекса – 0,16 при среднем значении 0,59. Оценка влияния проективного покрытия на NDVI, проведенная методом дисперсионного анализа, показала, что значения индекса, усредненные для различных градаций проективного покрытия, статистически достоверно различаются между собой. При этом значения NDVI растут по мере увеличения проективного покрытия (*табл. 1, рис. 2*), за величину класса которого был взят интервал 0,2 (20%).

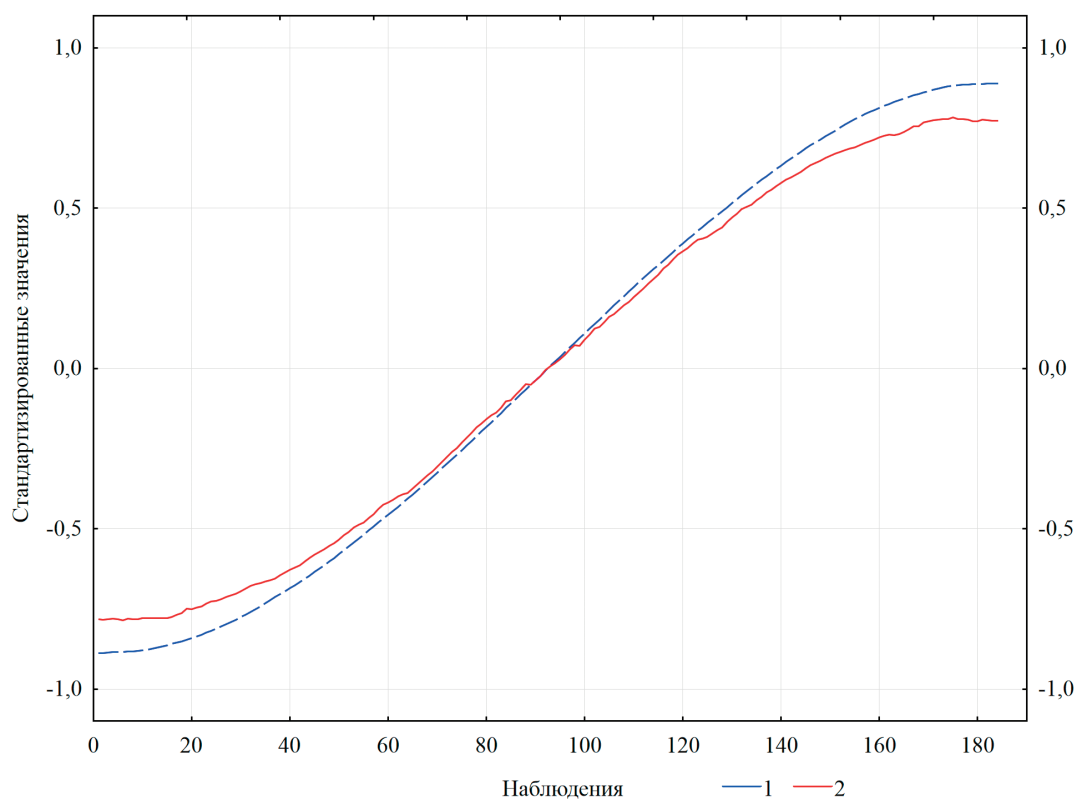


Рис. 1. Графики сглаженных рядов стандартизированных значений проективного покрытия (1) и NDVI (2). Исходные данные ранжированы по возрастанию

Таблица 1. Статистические характеристики значений NDVI, соответствующие различным классам проективного покрытия

<i>Проективное покрытие, %</i>	<i>Среднее</i>	<i>Ст. откл.</i>	<i>Дисперсия</i>	<i>Минимум</i>	<i>Максимум</i>
0-20	0,387	0,069	0,005	0,237	0,503
20-40	0,512	0,054	0,003	0,429	0,646
40-60	0,578	0,041	0,002	0,489	0,675
60-80	0,660	0,048	0,002	0,569	0,742
80-100	0,768	0,045	0,002	0,676	0,880

Соответственно, достоверные различия классов проективного покрытия по значениям NDVI указывают на высокую степень влияния проективного покрытия зеленой фитомассой на значения вегетационного индекса.

Наибольшая величина стандартного отклонения NDVI характерна для полей с малыми величинами проективного покрытия (0–20%), что, на наш взгляд, объясняется влиянием оголенной почвы, которая сама может различаться по ряду параметров (влажность, гранулометрический состав), а также влиянием сухой растительной массы. Тем не менее, несмотря на возможное влияние этих факторов (учет которых проблематичен), значения NDVI полей с малыми величинами проективного покрытия существенно ниже следующей по величине градации и статистически достоверно отличаются от нее.

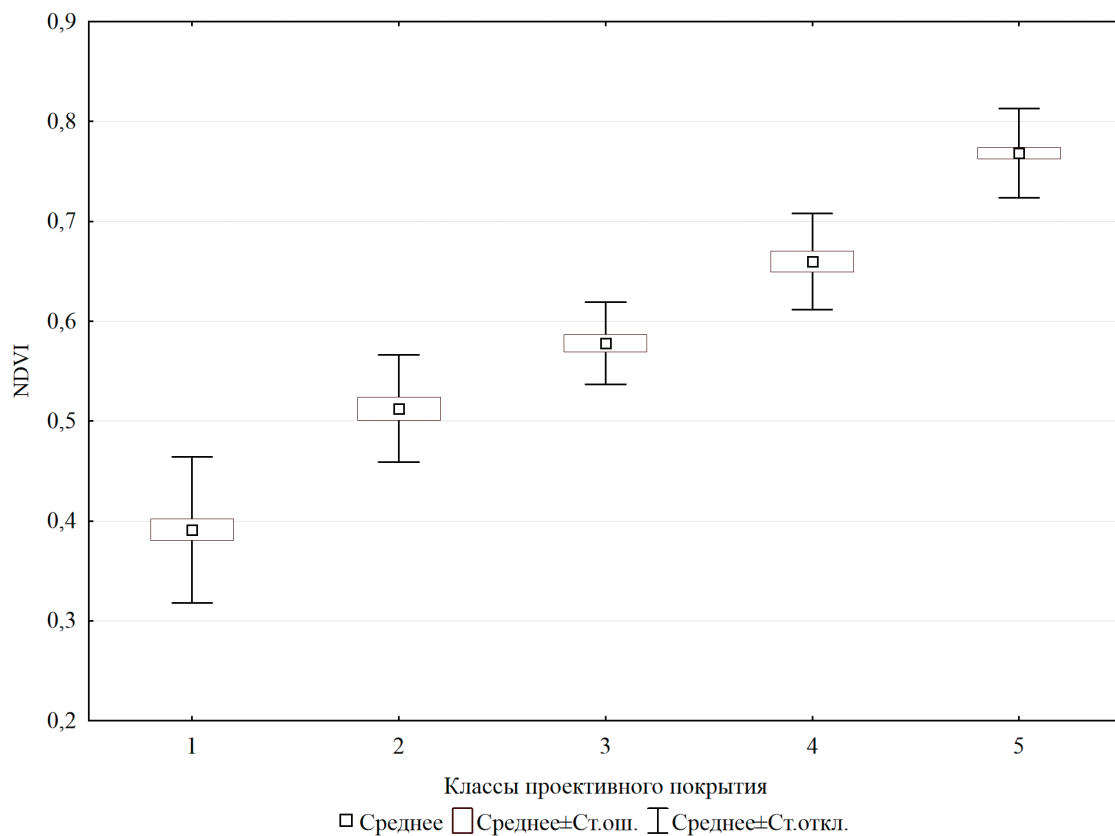


Рис. 2. Значения вегетационного индекса, соответствующие различным градациям проективного покрытия: 1 – 0–20%, 2 – 20–40%, 3 – 40–60%, 4 – 60–80%, 5 – 80–100%

Для количественного описания зависимости NDVI от проективного покрытия (рис. 3) нами были проанализированы различные уравнения связи между анализируемыми величинами (табл. 2).

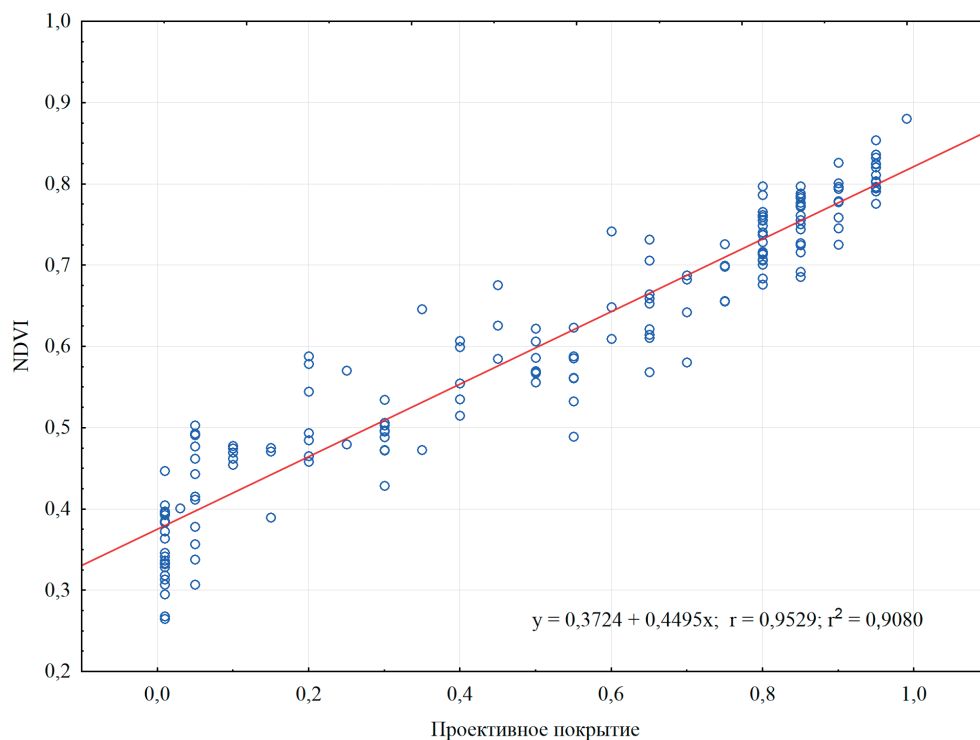


Рис. 3. График зависимости значений NDVI от величины проективного покрытия

Исходя из графика рассеяния исследуемых величин (построенного на основе данных за все анализируемые годы), видно, что по мере увеличения проективного покрытия значения NDVI располагаются более компактно вокруг линии регрессии, вследствие насыщения значений вегетационного индекса при возрастании объема зеленой растительной массы.

Таблица 2. Характеристики уравнений регрессионных зависимостей, описывающих связь между проективным покрытием и NDVI

<i>Вид зависимости</i>	<i>Уравнение связи</i>	<i>Коэффициент детерминации, R²</i>
Линейная	$NDVI = 0,449x + 0,372$	0,908
Экспоненциальная	$NDVI = 0,380e^{0,816x}$	0,865
Полином 2-го порядка	$NDVI = 0,022x^2 + 0,428x + 0,374$	0,908
Полином 3-го порядка	$NDVI = 0,806x^3 - 1,135x^2 + 0,843x + 0,356$	0,917

x- проективное покрытие, уровень значимости – 0,05

Из таблицы видно, что наибольшим коэффициентом детерминации характеризуется полиномиальное уравнение 3-й степени, но коэффициент его детерминации не намного выше, чем у уравнения линейного вида. Рассчитанные уравнения связи могут быть использованы для оценки проективного покрытия на основе изображений, сделанных в вегетационный сезон и при отсутствии снежного покрова, когда значения вегетационного индекса могут опускаться существенно ниже нуля.

Необходимо отметить, что в ряде исследований, проведенных для других типов растительного покрова, в том числе травянистого, (Rundquist, 2002; Glenn, 2008; Jiménez-Muñoz, 2009), связь между проективным покрытием и вегетационными индексами наилучшим образом описывается уравнением линейного или экспоненциального вида.

Количественная оценка влияния проективного покрытия на значения вегетационного индекса и вычисление уравнений связи этих показателей позволили провести экспериментальное геоинформационное картографирование сезонного изменения проективного покрытия для посевных площадей, типичных для территории Белгородской области (рис. 4).

Анализ сезонных картограмм проективного покрытия позволяет определять площади под некоторыми типами посевов, либо выявлять поля, находящиеся в состоянии чистого пара. В частности, по картограммам на рис. 4 можно оценить наличие озимых и многолетних трав в структуре посевов, т.к. в период апреля они будут характеризоваться высокими значениями проективного покрытия. Кроме того, сезонное картографирование величины проективного покрытия посевных площадей позволяет наглядно оценить динамику количества и территориальное распространение посевных площадей с наличием зеленой фитомассы. Изучение ее наличия или отсутствия на полях на протяжении вегетационного сезона дает возможность оценивать особенности сезонного использования конкретной посевной площади.

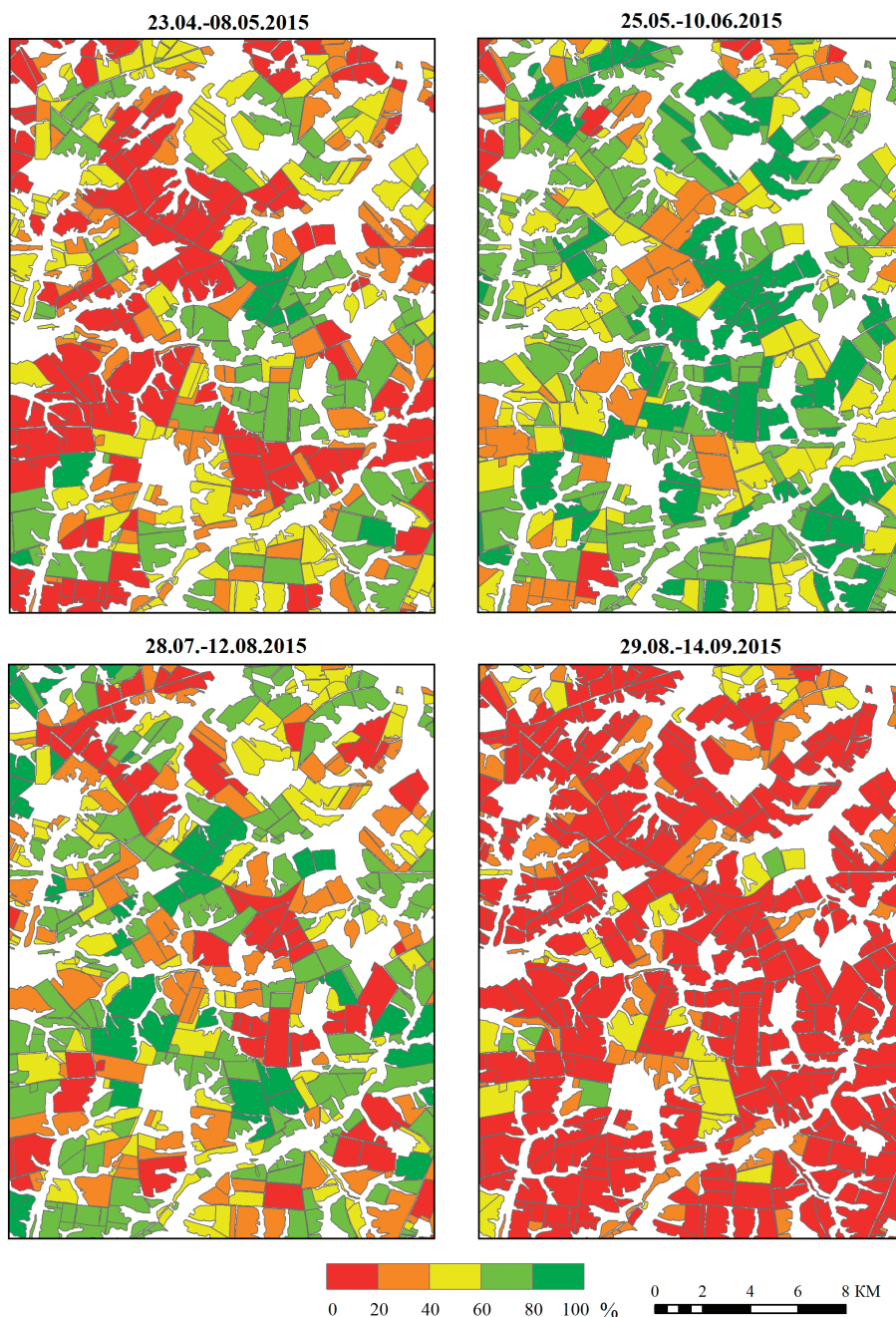


Рис. 4. Сезонное изменение проективного покрытия зеленой фитомассой посевных площадей, вычисленное на основе значений вегетационного индекса в 2015 г. (фрагмент территории Новооскольского района Белгородской области)

По совокупности картограмм (рис. 4) также можно определить посевные площади, находящиеся в состоянии чистого пара, выбрав участки, проективное покрытие которых на протяжении вегетационного сезона было крайне малым.

Выводы

Проведена количественная оценка влияния проективного покрытия зеленой фитомассой на значения вегетационного индекса NDVI для посевных площадей, типичных для территории Белгородской области. Анализ экспериментальных данных, полученных

за вегетационные периоды 2012–2015 гг., позволил выявить степень изменения вегетационного индекса в зависимости от проективного покрытия. Установлены достоверные различия между значениями индекса, соответствующими разным грациям проективного покрытия (от 0 до 100 %). Вычислены статистически значимые эмпирические зависимости, описывающие его связь с NDVI. Установлено, что достаточно полно связь между проективным покрытием и вегетационным индексом описывается уравнением линейного вида. Ограничения вычисленных уравнений связаны с периодом, когда значения вегетационного индекса опускаются значительно ниже нуля (преимущественно период снежного покрова). На основе установленных зависимостей показана возможность геоинформационного картографирования проективного покрытия и анализа его сезонной динамики.

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-4611.2016.5.

Литература

1. Бакурова К.Б., Юфеев В.Г. Эколого-экономическая оценка деградации агроландшафтов на основе дистанционного мониторинга // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2009. № 1. С. 79–83.
2. Бузук Г.Н. Определение проективного покрытия и урожайности при использовании фото точек (Photo point method) // Вестник фармации. 2013. № 3 (61). С. 74–80.
3. Бузук Г.Н. Применение функций роста и асимптотических функций при определении проективного покрытия и урожайности лекарственных растений // Вестник фармации. 2014. № 1 (63). С. 59–67.
4. Кынчева Р., Борисова Д., Георгиев Г. Декомпозиция спектральных смесей почва – растительность // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 226–232.
5. Малахов Д.В., Исламгулова А.Ф. Параметрическое дешифрирование изображений пастбищ: опыт применения данных дистанционного зондирования низкого и среднего разрешения // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7 (306). С. 587–592.
6. Музылев Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П., Волкова Е.В., Кухарский А.В., Успенский С.А. Использование данных дистанционного зондирования при моделировании компонент водного и теплового балансов территории Центрально-черноземных областей России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 17–34.
7. Терехин Э.А. Анализ многолетней динамики вегетационного индекса для посевных площадей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 48–58.
8. Carlson T., Ripley D. On the relationship between fractional vegetation cover, leaf area index, and NDVI // Remote Sensing of Environment. 1997. Vol. 62. P. 241–252.
9. Glenn E.P., Huete A.R., Nagler P.L., Nelson S.G. Relationship Between Remotely-sensed Vegetation Indices, Canopy Attributes and Plant Physiological Processes: What Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us About the Landscape // Sensors. 2008. Vol. 8. P. 2136–2160.
10. Jiang Z., Huete A., Chen J., Chen Y., Li J., Yan G., Zhang X. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction // Remote Sensing of Environment. 2006. Vol. 101. P. 366–378.
11. Jiménez-Muñoz J.C., Sobrino J.A., Plaza A., Guanter L., Moreno J., Martinez P. Comparison Between Fractional Vegetation Cover Retrievals from Vegetation Indices and Spectral Mixture Analysis: Case Study of PROBA/CHRIS Data Over an Agricultural Area // Sensors. 2009. Vol. 9. № 2. P. 768–793.
12. Johnson B, Tateishi R., Kobayashi T. Remote Sensing of Fractional Green Vegetation Cover Using Spatially-Interpolated Endmembers // Remote Sensing. 2012. Vol. 4. № 9. P. 2619–2634.
13. Li F., Kustas W., Preuger J., Neale C., Jackson T. Utility of remote sensing-based two-source balance model under low- and high-vegetation cover conditions // Journal of Hydrometeorology. 2005. Vol. 6. P. 878–891.
14. Rundquist B.C. The influence of canopy green vegetation fraction on spectral measurements over native tallgrass prairie // Remote Sensing of Environment. 2002. Vol. 81. P. 129–135.
15. Xiao J., Zhuang Q., Law B.E., Chen J., Baldocchi D.D., Ma S., Cook D.R., Oren R., Katul G.G., Richardson A.D., Wharton S., Falk M., Paw U K.T., Martin T.A., Verma S.B., Suyker A.E., Scott R.L., Monson R.K., Burns S.P., Litvak M. A continuous measure of gross primary production for the conterminous United States derived from MODIS and ameriflux data // Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114. P. 576–591.
16. Zhou Y., Zhang L., Xiao J., Chen S., Kato T., Zhou G. A. Comparison of Satellite-Derived Vegetation Indices for Approximating Gross Primary Productivity of Grasslands // Rangeland Ecology & Management. 2014. Vol. 67. P. 9–18.

Influence of crop areas vegetation cover fraction on their spectral reflectivity properties

E.A. Terekhin

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

Results of estimation of the influence fractional vegetation cover on the acreage NDVI vegetation index values were presented. The research was performed on the basis of information obtained from the crop area, typical of the Belgorod region and Tsentral'noye Chernozem'ye region. Estimation of impact of fractional vegetation cover on NDVI values was performed on the basis of experimental data collected during the 2012-2015 at different times of the vegetation season. It was found that vegetation index values are significantly different for different classes of fractional vegetation cover. For crop areas with high vegetation cover fraction, lower values of vegetation index standard deviation are observed. On the basis of a sample of 184 measurements a quantitative assessment of vegetation index depending on the fractional vegetation cover was carried out. It was found that the equations of linear type describe the relationship between vegetation cover fraction and vegetation index values best. The increase in the values of vegetation cover fraction corresponds to the growth of vegetation index values. The calculated relationship allowed assessing the seasonal dynamics of fractional vegetation cover for the acreage of the Belgorod region. The capability of GIS-mapping of fractional vegetation cover at the level of specific acreage is shown. The capability to estimate fractional vegetation cover seasonal dynamics and its use to determine the state of vegetation of a specific agricultural field is demonstrated.

Keywords: vegetation cover fraction, remote sensing, vegetation cover, NDVI, vegetation indices, crop areas, GIS-mapping

Accepted: 09.06.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-61-71

References

1. Bakurova K.B., Yuferev V.G. Ekologo-ekonomicheskaya otsenka degradatsii agrolandshaftov na osnove distantsionnogo monitoring (Ecologic and economic estimation of agrilandscape degradation on the basis of distant monitoring), *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*, 2009, No. 1, pp. 79–83.
2. Buzuk G.N. Opredelenie proektivnogo pokrytiya i urozhainosti pri ispol'zovanii foto tochek (Photo point method) (Determination of the projective cover and productivity when using photo points), *Vestnik farmatsii*, 2013, No. 3 (61), pp. 74–80.
3. Buzuk G.N. Primenenie funktsii rosta i asimptoticheskikh funktsii pri opredelenii proektivnogo pokrytiya i urozhainosti lekarstvennykh rastenii (Application growth function and asymptotic functions on certain vegetation cover fraction and yield herbs), *Vestnik farmatsii*, 2014, No. 1, (63), pp. 59–67.
4. Kyncheva R., Borisova D., Georgiev G. Dekompozitsiya spektral'nykh smesei pochva –rastitel'nost' (Endmember decomposition techniques from soil-vegetation mixture reflectance), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 226–232.
5. Malakhov D.V., Islamgulova A.F. Parametricheskoe deshifirovanie izobrazhenii pastbishch: opyt primeneniya dannykh distantsionnogo zondirovaniya nizkogo i srednego razresheniya (The quantitative interpretation of pasture image parameters: an experience of low and moderate spatial resolution remotely sensed data application), *Optika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 27, No. 7 (306), pp. 587–592.
6. Muzylev E.L., Uspenskii A.B., Startseva Z.P., Volkova E.V., Kukharskii A.V., Uspenskii S.A. Ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniya pri modelirovanii komponent vodnogo i teplovogo balansov territorii Tsentral'no-chernozemnykh oblastei Rossii (Utilization of remote sensing data for modeling water and heat balance components of the Russian Central Black Earth Region territory), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 17–34.
7. Terekhin E.A. Analiz mnogoletnei dinamiki vegetatsionnogo indeksa dlya posevnykh ploshchadei (Analysis of vegetation index long-term dynamics for crop areas), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 48–58.
8. Carlson T., Ripley D. On the relationship between fractional vegetation cover, leaf area index, and NDVI, *Remote Sensing of Environment*, 1997, Vol. 62, pp. 241–252.
9. Glenn E.P., Huete A.R., Nagler P.L., Nelson S.G. Relationship Between Remotely-sensed Vegetation Indices, Canopy Attributes and Plant Physiological Processes: What Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us About the Landscape, *Sensors*, 2008, Vol. 8, pp. 2136–2160.
10. Jiang Z., Huete A., Chen J., Chen Y., Li J., Yan G., Zhang X. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 101, pp. 366–378.
11. Jiménez-Muñoz J.C., Sobrino J.A., Plaza A., Guanter L., Moreno J., Martínez P. Comparison Between Fractional Vegetation Cover Retrievals from Vegetation Indices and Spectral Mixture Analysis: Case Study of PROBA/CHRIS Data Over an Agricultural Area, *Sensors*, 2009, Vol. 9, No. 2, pp.768–793.

12. Johnson B, Tateishi R., Kobayashi T. Remote Sensing of Fractional Green Vegetation Cover Using Spatially-Interpolated Endmembers, *Remote Sensing*, 2012, Vol. 4, No. 9. pp. 2619–2634.
13. Li F., Kustas W., Preuger J., Neale C., Jackson T. Utility of remote sensing-based two-source balance model under low- and high-vegetation cover conditions, *Journal of Hydrometeorology*, 2005, Vol. 6, pp. 878–891.
14. Rundquist B.C. The influence of canopy green vegetation fraction on spectral measurements over native tallgrass prairie, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 81, pp. 129–135.
15. Xiao J., Zhuang Q., Law B.E., Chen J., Baldocchi D.D., Ma S., Cook D.R., Oren R., Katul G.G., Richardson A.D., Wharton S., Falk M., Paw U K.T., Martin T.A., Verma S.B., Suyker A.E., Scott R.L., Monson R.K., Burns S.P., Litvak M. A continuous measure of gross primary production for the conterminous United States derived from MODIS and ameriflux data, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114, pp. 576–591.
16. Zhou Y., Zhang L., Xiao J., Chen S., Kato T., Zhou G. A. Comparison of Satellite-Derived Vegetation Indices for Approximating Gross Primary Productivity of Grasslands, *Rangeland Ecology & Management*, 2014, Vol. 67, pp. 9–18.