

DOI: 10.12731/2658-6649-2021-13-6-119-131

УДК 63.631.471:52.528.873.041.3

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ПОЧВЕННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ SENTINEL-2

А.И. Павлова

В настоящее время актуальны работы, посвященные созданию цифровых почвенных карт с применением географических информационных систем (ГИС) и данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ). В работе выполнен анализ вегетационных индексов (ВИ) для картографирования почвенного покрова, были созданы карты вегетационных индексов: нормализованный относительный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), оптимизированный почвенный вегетационный индекс (Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index, OSAVI), вегетационный индекс растительности с поправкой на почву (Soil-Adjusted Vegetation Index, SAVI), преобразованный вегетационный индекс с поправкой на почву (Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index, TSAVI), улучшенный вегетационный индекс (Enhanced vegetation index2, EVI2) на территорию хозяйства ЗАО «Мирный» Коченевского района с использованием космического снимка Sentinel-2 A (10 мая 2021 г.). В результате выявлено, что вегетационные индексы OSAVI и EVI2 позволяют установить пространственные границы между основными типами почв автоморфного, полугидроморфного и гидроморфного режимов увлажнения.

Обоснование. *Большее практическое применение находят многозональные космические и аэрофотоснимки для тематического картографирования почвенных ресурсов. В статье использован космический снимок Sentinel-2 A, имеющий хорошее пространственное и спектрозональное разрешение (10 м, 20 м и 60 м), территориальный охват. Это позволило вычислить и проанализировать различные вегетационные индексы для целей цифрового почвенного картографирования.*

Цель работы – *анализ вегетационных индексов для цифрового почвенного картографирования на основе снимков Sentinel-2 A.*

Материалы и методы исследования. *Исследования выполнены на территории хозяйства ЗАО «Мирный» Коченевского района Новосибирской области. В работе использованы методы цифровой обработки космических*

снимков, картографирования и геоинформационного анализа с привлечением космического снимка Sentinel-2 A (10 мая 2021 г.). Для сравнительного анализа ВИ использован способ равных интервалов. Это позволило с помощью ГИС ArcGIS составить тематические карты ВИ в выделении градаций: очень низкое, низкое, среднее, выше среднего, высокое значение.

Результаты исследования и обсуждение. На территории хозяйства ЗАО «Мирный» Коченевского района Новосибирской области выполнены полевые почвенные обследования. С помощью геоинформационной системы SAGA выполнена атмосферная коррекция космического снимка и его пространственная привязка, составлены растровые карты NDVI, OSAVI, TSAVI, EVI2. В ходе геоинформационного анализа крупномасштабной почвенной карты 1:1000 и растровых карт ВИ выявлено, что OSAVI позволяет установить пространственные границы между основными типами почв автоморфного, полугидроморфного и гидроморфного режимов увлажнения. Очень низкие значения ВИ характерны для почв гидроморфного режима увлажнения, сформированных вблизи небольших озер, вдоль берегов р. Шариха. Очень низкие значения ВИ имеют объекты гидрографии, болотные торфяные, лугово-болотные перегнойные почвы, солоды заболоченные и солоды оторфованные, солончаково-болотные, солончаки болотные, сформированные в пониженных участках рельефа с глубиной залегания грунтовых вод менее 0,5 м. Низкие значения ВИ вычислены для вспаханных черноземов обыкновенных, залегающих в верхней и средней части пологого склона. Это почвы автоморфного режима увлажнения с глубиной залегания грунтовых вод более 6 м. Средние и выше среднего значения характерны для серых лесных осолоделых почв под древесной растительностью, а также для лугово-черноземных почв под луговой растительностью в нижней части пологого склона с глубиной залегания грунтовых вод от 3 до 4 м. Высокие значения ВИ получены для луговых почв с густым травянистым покровом. Условия увлажнения почв, залегание в рельефе, тип растительности существенно влияют на значения ВИ. Полученные значения ВИ могут быть использованы на этапе подготовки обучающих данных в виде эталонов классов для основных типов почв, необходимых для автоматического распознавания изображений.

Ключевые слова: цифровое почвенное картографирование; географические (геоинформационные) информационные системы; космические снимки; индексы вегетации; сельское хозяйство

Для цитирования. Павлова А.И. Применение вегетационных индексов для цифрового почвенного картографирования на основе космических снимков SENTINEL-2 // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2021. Т. 13, № 6. С. 119-131. DOI: 10.12731/2658-6649-2021-13-6-119-131

APPLICATION OF VEGETATION INDECES FOR DOGITAL SOIL MAPPING BASED ON SENTINEL-2 SPACE IMAGES

A.I. Pavlova

At present, the works devoted to the creation of digital soil maps using geographic information systems (GIS) and remote sensing (RS) data are relevant. In the work the analysis of vegetation indices (VI) for soil mapping was carried out, the maps of vegetation indices were created: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index (OSAVI), Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index (TSAVI), Enhanced Vegetation Index2 (EVI2) for the territory of ZAO Mirny farm of Kochenevsky District using Sentinel-2 A satellite image (May 10, 2021).). As a result it was revealed that the vegetation indices OSAVI and EVI2 allow to establish spatial boundaries between the main types of soils of automorphic, half-hydromorphic and hydromorphic moisture regimes.

Background. *Multispectral space and aerial photos for thematic mapping of soil resources are of greater practical application. Sentinel-2 A space image with good spatial and spectrozonal resolution (10 m, 20 m and 60 m) and territorial coverage (290 km) was used in this article. This made it possible to calculate and analyze various vegetation indices for the purposes of digital soil mapping.*

Purpose. *Analysis of vegetation indices for digital soil mapping based on Sentinel-2 A images.*

Materials and research methods. *The research was carried out on the territory of CJSC Mirny, Kochenevsky District, Novosibirsk Region. The methods of digital processing of space images, mapping and geoinformation analysis with the use of Sentinel-2 A satellite image (May 10, 2021) were used. The method of equal intervals was used for comparative analysis of images. This allowed using GIS ArcGIS to make thematic maps of images with the allocation of gradations: very low, low, average, above average, high value.*

Results. *Field soil surveys were carried out on the territory of CJSC Mirny farm in Kochenevsky district of Novosibirsk Region. Using SAGA geoinformation system the space image was atmospherically corrected and spatially referenced, NDVI, OSAVI, TSAVI, EVI2 raster maps were compiled. Geoinformation analysis of the large-scale 1:1000 soil map and raster EVI maps revealed that OSAVI allows to establish spatial boundaries between the main types of soils of automorphic, half-hydromorphic and hydromorphic moisture regimes. Very low values of VI are*

typical for the soils of hydromorphic humidification regime, formed near small lakes, along the banks of the Sharikh river.

Very low values of UI have objects of hydrography, marsh peaty, meadow-marsh humus soils, marshy and peated marshes, marsh solonchaks, marsh solonchaks, formed in lowered areas of relief with depth of groundwater occurrence less than 0.5 m.

Ploughed ordinary chernozems, deposited in the upper and middle part of the gentle slope, have low values of WP. These are soils of automorphous moisture regime with depth of groundwater occurrence more than 6 m.

Average and above average values are characteristic of gray forest saltwort soils under woody vegetation, as well as meadow-chernozem soils under meadow vegetation in the lower part of the gentle slope with groundwater occurrence depth from 3 to 4 m. High WI values were obtained for meadow soils with dense grass cover. Wetting conditions of soils, location in the relief, and vegetation type significantly influence VI values. The obtained VV values can be used at the stage of training data preparation in the form of reference classes for basic soil types required for automatic image recognition.

Keywords: *digital soil mapping, geographic (geoinformation) information systems, space images, vegetation indices, agriculture*

For citation. *Pavlova A.I. Application of Vegetation Indices for Digital Soil Mapping Based on SENTINEL-2 Satellite Images. Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture, 2021, vol. 13, no. 6, pp. 119-131. DOI: 10.12731/2658-6649-2021-13-6-119-131*

Основным источником получения пространственной информации о почвенных ресурсах служат космические снимки среднего пространственного разрешения. Разновременные космические снимки спутника MODIS используются для мониторинга земель [7-8], прогнозирования урожайности культур [19, 20].

Применение снимков искусственных спутников Landsat-7 и Landsat-8 позволяет с более высокой точностью и детальностью распознавать объекты местности [15, 22]. Новые возможности для почвенного картографирования открылись с появлением первых коммерческих спутников WorldView-2 и WorldView-3 (DigitalGlobe, Longmont, CO, USA). Данные WorldView-2 обладают высоким пространственным разрешением (0,46 м в панхроматическом диапазоне и 1,84 м в восьми спектральных диапазонах) [24]. Однако существенным ограничением широко применения снимков спутников WorldView-2 и WorldView-3 является их высокая коммерческая стоимость.

В рамках программы «Глобальный мониторинг безопасности окружающей среды» (The Global Monitoring for Environment and Security, GMES) реализованы спутники Sentinel 1, 2, 3, 5, 6. Космические снимки спутника Sentinel-2A распространяются свободно, характеризуются большим территориальным охватом, периодичностью, высоким пространственным (10 м, 20 м, 60 м) и радиометрическим разрешением (12 бит/пиксель). Наличие тринадцати спектральных каналов обеспечивает возможности анализа и картографирования почвенных, водных, земельных и иных ресурсов на основе карт вегетационных индексов (ВИ) [12, 23, 25]. Данные аэрофотосъемки местности с помощью управляемого беспилотного летательного аппарата рассматриваются в качестве более дешевой и оперативной альтернативы использования спутниковых дорогостоящих данных космической съемки для картографирования земель и почв, развития «умного земледелия» [1, 2, 10, 17, 18].

Известны различные индексы вегетации, подбираемые эмпирическим путем на основе изучения спектральной отражательной способности почв, растительных сообществ и природно-территориальных комплексов [3-6, 11, 16, 21, 26]. В большинстве случаев для их вычисления используют два участка электромагнитного спектрального диапазона: красную и ближнюю инфракрасную зоны. В пределах красной зоны спектрального диапазона приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом [3,13]. Ближнюю инфракрасную зону связывают с максимальным отражением энергии клеточной структурой листовой поверхности растений. Фотосинтетическая активность определяет более низкое значение коэффициентов отражения в красной зоне электромагнитного спектра и увеличению значений в ближней инфракрасной [9, 14, 16, 26].

Цель работы – анализ вегетационных индексов для цифрового почвенного картографирования на основе космических снимков Sentinel-2 A.

Материалы и методы

Исследования выполнены на территории хозяйства ЗАО «Мирный» Коченевского района Новосибирской области. В рельефе на слабоволнистой равнине с абсолютными высотами от 60 до 185 м, выделяются эрозионные формы рельефа вдоль берегов р. Чик и Шариха.

В работе использован космический снимок Sentinel-2A (10 мая 2021 г.) имеющий тринадцать спектральных каналов видимого, красного, инфракрасного диапазонов, а также каналы VNIR и SWIR. Вычисле-

ны ВИ широко применяемые для картографирования растительности: нормализованный относительный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) [22, 26], оптимизированный индекс растительности с поправкой на почву (Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index, OSAVI) [21], преобразованный вегетационный индекс с поправкой на почву (Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index, TSAVI) [4], улучшенный вегетационный индекс (Enhanced vegetation index2, EVI2) [20].

Результаты работы

На территорию исследований с помощью беспилотного летательного аппарата была выполнена аэрофотосъемка местности, в результате которой составлен крупномасштабный ортофотоплан 1:1000. В результате полевых почвенных обследований была составлена крупномасштабная почвенная карта с помощью ГИС ArcGIS (рис. 1, табл. 1) [1].

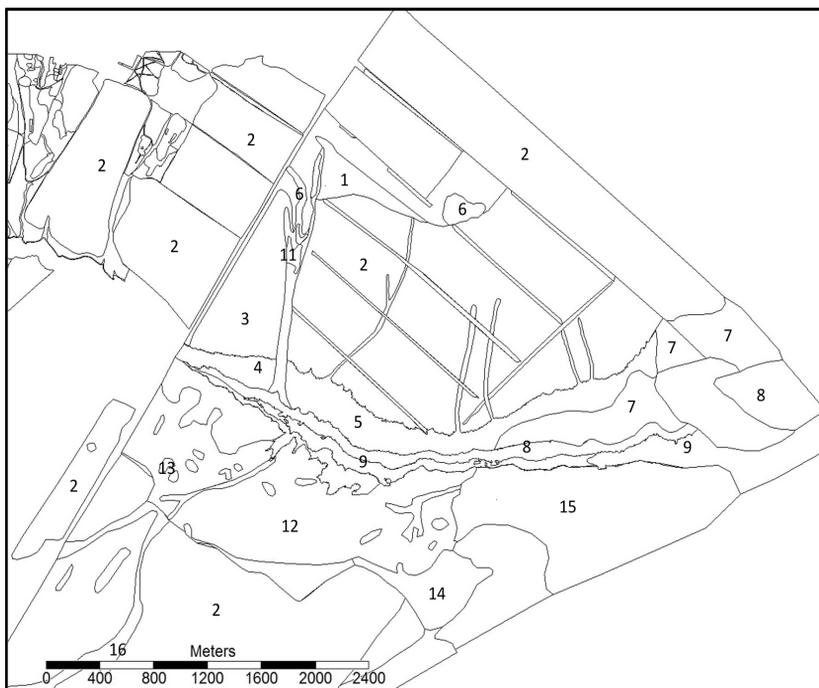


Рис. 1. Почвенные контуры на территории тестового участка

Таблица.

Почвы, распространенные на территории тестового участка

Номер на карте	Наименование почвы
1	Черноземы обыкновенные среднесиловые мало- и среднегумусные в комплексе с серыми лесными осолоделыми до 25%
2	Черноземы обыкновенные среднесиловые среднегумусные
3	Лугово-черноземные среднесиловые среднегумусные
4	Лугово-черноземные среднесиловые среднегумусные слабосмытые
5	Лугово-черноземные малосиловые среднегумусные слабосмытые
6	Луговые осолоделые малосиловые среднегумусные
7	Черноземно-луговые солончаковатые малосиловые среднегумусные
8	Луговые солончаковые малосиловые среднегумусные
9	Луговые солончаковые малосиловые малогумусные
10	Болотные низинные торфянисто-глеевые
11	Лугово-болотные перегонные
12	Солоди заболоченные
13	Солоди оторфованные
14	Солончаково-болотные
15	Солончаки болотные
16	Светло-серые лесные осолоделые
16	Серые лесные осолоделые малосиловые

Выполнена цифровая обработка космического снимка с помощью ГИС SAGA включающая геометрические, радиометрические и яркостные преобразования. Геометрические преобразования предусматривают географическую привязку и трансформирование космического снимка. Радиометрические операции позволили восстановить пропущенные пиксели, а также устранить влияние атмосферы. Яркостные преобразования произведены с целью увеличения контрастности изображений, синтеза цветных изображений и приведения спектральных каналов к единому пространственному разрешению. Для сравнительного анализа созданы тематические карты (рис. 2) и получены показатели ВИ (табл. 2).

В результате геоинформационного анализа крупномасштабной почвенной карты и растровых карт ВИ выявлено, что применение OSAVI позволяет более детально выявить границы между типами почв в сравнении с NDVI, EVI2, TSAVI. Очень низкие значения ВИ OSAVI имеют объекты гидрографии, болотные низинные торфянисто-глеевые и лугово-болотные перегонные почвы, залегающие в наиболее пониженных формах рельефа у реки или вблизи заболоченных озер с глубиной залегания грунтовых вод менее 0,5 м.

Таблица 2.

Вегетационные индексы

Индекс вегетации	NDVI	OSAVI	TSAVI	EVI2
Очень низкое	от -0,1 до 0,05	от -0,04 до 0,05	от 0,06 до 0,09	от -0,02 до 0,03
Низкое	от 0,05 до 0,21	от 0,05 до 0,14	от 0,09 до 0,12	от 0,03 до 0,09
Среднее	от 0,21 до 0,36	от 0,14 до 0,23	от 0,12 до 0,15	от 0,09 до 0,15
Выше среднего	от 0,36 до 0,51	от 0,23 до 0,33	от 0,15 до 0,18	от 0,15 до 0,20
Высокое	От 0,51 до 0,66	от 0,33 до 0,42	от 0,18 до 0,21	от 0,20 до 0,26

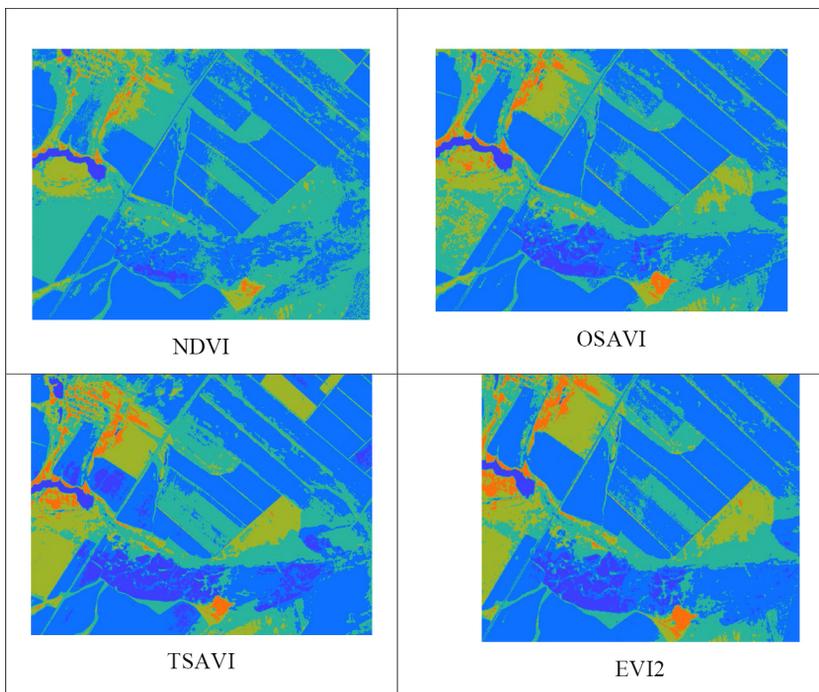


Рис. 2. Карты индексов вегетации (■ - очень низкое, ■ - низкое, ■ - среднее, ■ - выше среднего, ■ - высокое значение)

Низкие значения индексов вегетации OSAVI получены для открытых участков, свежеспаханных черноземов обыкновенных и черноземов обыкновенных в комплексе с серыми лесными осолоделыми до 25%, на занятых

растительным покровом. Эти почвы сформированы в верхней части пологого склона с глубиной залегания грунтовых вод более 6 м. Пространственное разрешение космического снимка не позволяет выделить микроформы рельефа. Однако в процессе оверлейного наложения крупномасштабной почвенной карты и карты OSAVI, что значения индексов увеличиваются в ложбине стока и на участке, еще не обработанном от стерни (на рис. 1 показан в виде прямоугольника). Средние значения ВИ OSAVI получены для серых лесных осолоделых, лугово-черноземных несмытых и слабосмытых почв. Выше среднего значения имеют черноземно-луговые солончаковатые почвы. Высокие значения ВИ OSAVI вычислены для луговых почв.

Заключение

Условия увлажнения почв, залегание в рельефе, тип растительности существенно влияют на значения ВИ. Индекс вегетации OSAVI позволяет более детально выявить границы между типами почв в сравнении с NDVI, EVI2, TSAVI. Дальнейшие исследования направлены на разработку эталонов классов по основным типам почв для возможности автоматизированного распознавания космических снимков и картографирования почв.

Список литературы

1. Каличкин В.К., Павлова А.И., Шоба В.Н., Каличкин А.В. Интеграция агроэкологических и технологических свойств земель // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 13, N. 3. С. 11-14. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10302>
2. Савин И.Ю., Вернюк Ю.И., Фараслис И. Возможности использования беспилотных летательных аппаратов для оперативного мониторинга продуктивности почв // Бюллетень почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. 2015. № 80. С. 95-105.
3. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. № 3. С.28-32.
4. Baret F., Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment // Remote Sensing of Environment. 1991. Vol. 35. pp. 161-173.
5. Clevers J. G. P. W., Gitelson A. A. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and-3 // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2013. No. 23. pp. 344-351.
6. Gao B.-C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. Vol. 58. pp. 257-266.

7. Gitelson A. A., Kaufman, Y. J., Merzlyak M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS // *Remote Sensing of Environment*. 1996. Vol. 58. pp. 289-298.
8. Giteson A A, Kaufman Y J. MODIS NDVI optimization to fit the AVHRR data series-spectral considerations // *Remote Sensing of Environment*. 1998. Vol. 66. pp. 343-350.
9. Gitelson A. A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation // *Journal of plant physiology*. 2004. No. 161. pp. 165-173.
10. Haboudane D., Miller J. R., Tremblay N., Zarco-Tejada P. J., Dextraze L. Integrated narrowband vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 81. pp. 416-426.
11. Hardisky M. A., Klemas V., Smart R. M. The influences of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alterniflora* canopies // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1983. No. 49. pp. 77-83.
12. Hill M. J. Vegetation index suites as indicators of vegetation state in grassland and savanna: An analysis with simulated SENTINEL 2 data for a North American transect // *Remote Sensing of Environment*. 2013. No. 137. pp. 94-111.
13. Houborg R., Fisher J.B., Skidmore A.K. Advances in remote sensing of vegetation function and traits // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 2015. Vol. 43. pp.1-6.
14. Huan Jing-feng, Tang Yan-Lin New vegetation index and its application in estimation leaf area index of rice // *Rice Ecience*. 2007. Vol. 14, No. 3. pp. 195-203. [https://doi.org/10.1016/S1672-6308\(07\)60027-4](https://doi.org/10.1016/S1672-6308(07)60027-4)
15. Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) // *Remote Sensing of Environment*. 1988. No. 5. pp. 295-309.
16. Jiang Z. Y., Huete A. R., Didan K., Miura T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band // *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112. pp. 3833-3845.
17. Lee W.S., Alchanatis V., Yang C., Hirafuji M.; Moshou D., Li, C. Sensing technologies for precision specialty crop production // *Comput. Electron. Agric.* 2010. Vol. 74. pp. 2-33.
18. Li L., Zhu D., Yao S. at al. Design and implementation of geographic information systems, remote sensing, and global positioning system –based information platform for locust control // *Journal Applied Remote Sensing*. 2014. Vol.8 (1). 084899 <https://doi.org/10.1117/1.JRS.8.084899>
19. Lv T. T., Liu C. Study on extraction of crop information using time-series MODIS data in the Chao Phraya Basin of Thailand // *Advances in Space Research*. 2010. No. 45. pp. 775-784.

20. Miura T., Yoshioka H., Fujiwara K., Yamamoto H. Inter-comparison of ASTER and MODIS surface reflectance and vegetation index products for synergistic applications to natural resource monitoring. *Sensors*. 2008. No. 8. pp. 2480–2499.
21. Rondeaux G., Steven M., Baret F. Optimisation of soil adjusted vegetation indices // *Remote sensing of Environment*. 1996. Vol. 55. Iss. 2. pp. 95-107. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7)
22. Tucker C. J. Monitoring corn and soybean crop development with hand-held radiometer spectral data // *Remote Sensing of Environment*. 1979. Vol. 8. pp. 237-248.
23. Vaudour E., Gomez C., Fouad Y., Lagacherie. Sentinel-2 image capacities to predict common topsoil properties of temperature and Mediterranean agroecosystem // *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 223. pp. 21-23.
24. Vermeulen D., Niekerk A. Evaluation of a WorldView-2 image for soil salinity monitoring in a moderately affected irrigated area // *Journal of Applied Remote Sensing*. 2016. Vol. 10 (2), 026025. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.026025>
25. Wang K., Yanbing Q., Guo W., Zhang J., Chang Q. Retrieval and mapping of soil organic carbon using Sentinel-2A spectral images from bare cropland in Autumn // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. No. 1072. <https://doi.org/10.3390/rs13061072>
26. Yoder B. J., Waring R. H. The normalized vegetation index of small douglas-fir canopies with varying chlorophyll concentration // *Remote Sensing of Environment*. 1994. Vol. 49. pp. 81-91.

References

1. Kalichkin V.K., Pavlova A.I., Shoba V.N., Kalichkin A.V. Integration of agroecological and technological properties of land. *Achievements of Science and Technology of the Agroindustrial Complex*, 2019, vol. 13, no. 3, pp. 11-14. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10302>
2. Savin I.Y., Vernyuk Y.I., Faraslis I. Possibilities of using drones for operational monitoring of soil productivity. *Bulletin of Soil Institute named after V.V. Dokuchaev*. 2015, no. 80, pp.95 - 105
3. Cherepanov, A.S. Spectral properties of vegetation and vegetation indices / A.S. Cherepanov, E.G. Druzhinina. *Geomatics*, 2009, no. 3, pp.28-32.
4. Baret F., Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 1991, vol. 35, pp. 161-173.
5. Clevers J. G. P. W., Gitelson A. A. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and-3. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, no. 23, pp. 344–351.
6. Gao B.-C. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996, vol. 58, pp. 257-266.

7. Gitelson A. A., Kaufman, Y. J., Merzlyak M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 1996, vol. 58, pp. 289-298.
8. Giteson A. A., Kaufman Y. J. MODIS NDVI optimization to fit the AVHRR data series-spectral considerations. *Remote Sensing of Environment*, 1998, vol. 66, pp. 343-350.
9. Gitelson A. A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of Plant Physiology*, 2004, no. 161, pp. 165-173.
10. Haboudane D., Miller J. R., Tremblay N., Zarco-Tejada P. J., Dextraze L. Integrated narrowband vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 2002, vol. 81, pp. 416-426.
11. Hardisky M. A., Klemas V., Smart R. M. The influences of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1983, no. 49, pp. 77-83.
12. Hill M. J. Vegetation index suites as indicators of vegetation state in grassland and savanna: An analysis with simulated SENTINEL 2 data for a North American transect. *Remote Sensing of Environment*, 2013, no. 137, pp. 94-111.
13. Houborg R., Fisher J.B., Skidmore A.K. Advances in remote sensing of vegetation function and traits. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 2015, vol. 43, pp. 1-6.
14. Huan Jing-feng, Tang Yan-Lin New vegetation index and its application in estimation leaf area index of rice. *Rice Eciencie*, 2007, vol. 14, no. 3, pp. 195-203. [https://doi.org/10.1016/S1672-6308\(07\)60027-4](https://doi.org/10.1016/S1672-6308(07)60027-4)
15. Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 1988, no. 5, pp. 295-309.
16. Jiang Z. Y., Huete A. R., Didan K., Miura T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, 2008, vol. 112, pp. 3833-3845.
17. Lee W.S., Alchanatis V., Yang C., Hirafuji M.; Moshou D., Li, C. Sensing technologies for precision specialty crop production. *Comput. Electron. Agric.* 2010, vol. 74, pp. 2-33.
18. Li L., Zhu D., Yao S. at al. Design and implementation of geographic information systems, remote sensing, and global positioning system –based information platform for locust control // *Journal Applied Remote Sensing*. 2014, vol. 8 (1), 084899 <https://doi.org/10.1117/1.JRS.8.084899>
19. Lv T. T., Liu C. Study on extraction of crop information using time-series MODIS data in the Chao Phraya Basin of Thailand. *Advances in Space Research*, 2010, no. 45, pp. 775-784.

20. Miura T., Yoshioka, H., Fujiwara K., Yamamoto H. Inter-comparison of ASTER and MODIS surface reflectance and vegetation index products for synergistic applications to natural resource monitoring. *Sensors*, 2008, no. 8, pp. 2480-2499.
21. Rondeaux G., Steven M., Baret F. Optimisation of soil adjusted vegetation indices. *Remote sensing of Environment*, 1996, vol. 55, iss. 2, pp. 95 -107. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7)
22. Tucker C. J. Monitoring corn and soybean crop development with hand-held radiometer spectral data. *Remote Sensing of Environment*, 1979, vol. 8, pp. 237-248.
23. Vaudour E., Gomez C., Fouad Y., Lagacherie. Sentinel-2 image capacities to predict common topsoil properties of temperature and Mediterranean agroecosystem. *Remote Sensing of Environment*, 2019, vol. 223, pp. 21-23.
24. Vermeulen D., Niekerk A. Evaluation of a WorldView-2 image for soil salinity monitoring in a moderately affected irrigated area. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2016, vol. 10(2), 026025 <https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.026025>
25. Wang K., Yanbing Q., Guo W., Zhang J., Chang Q. Retrieval and mapping of soil organic carbon using Sentinel-2A spectral images from bare cropland in Autumn. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, no. 1072. <https://doi.org/10.3390/rs13061072>
26. Yoder B. J., Waring R. H. The normalized vegetation index of small douglas-fir canopies with varying chlorophyll concentration. *Remote Sensing of Environment*, 1994, vol. 49, pp. 81-91.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Павлова Анна Илларионовна, кандидат технических наук, доцент
Новосибирский государственный университет экономики и управления
ул. Каменская, 56, г. Новосибирск, 630039, Российская Федерация
annstab@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Anna I. Pavlova, PhD (technical sciences), Associate Professor
Novosibirsk State University of Economics and Management
56, Kamenskaya Str., Novosibirsk, 630039, Russian Federation
SPIN-code: 8714-1140
ORCID: 0000-0001-6159-1439
Scopus Author ID: 0000-0001-6159-1439

Поступила 24.11.2021

После рецензирования 28.11.2021

Принята 30.11.2021

Received 24.11.2021

Revised 28.11.2021

Accepted 30.11.2021