

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ НАНОСПУТНИКОВ PLANETSCOPE ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

*В статье рассмотрено использование данных наноспутников PlanetScope, выполняющих съемку поверхности Земли 2-3 раза в день с пространственным разрешением 3-4 м в четырех спектральных диапазонах, для мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур. Проведен сравнительный анализ изображений временного ряда вегетационных индексов NDVI, полученных по данным наноспутников PlanetScope, и вегетационных индексов (ВИ), рассчитанных на основе Sentinel-2. Временной ряд данных дистанционного зондирования Земли построен на основе многоспектральных съемок спутников в течение периода интенсивного нарастания вегетативной биомассы озимой пшеницы.*

*По данным вегетационных индексов NDVI, рассчитанных по значениям внеатмосферного излучения на основе сцен PlanetScope и Sentinel-2, установлены ассоциации, которые позволяют свести к минимуму несоответствия кросс-сенсоров PlanetScope с данным сенсоров Sentinel-2 для различных условий съемки. При этом важными факторами выступают минимальные изменения значений NDVI, характеризующие состояние культур в связи с минимальными временными рамками получения данных. Это позволило разработать алгоритм автоматизированного перевода сырых данных временных рядов в последовательные и атмосферно скорректированные значения NDVI. Алгоритм позволяет использовать данные PlanetScope для создания временных рядов вегетационных индексов и оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур на небольших площадях, в частности для фермерских хозяйств.*

*Ключевые слова: PlanetScope; Sentinel-2; NDVI; наноспутники; атмосферная коррекция.*

**Вступление.** Основным ограничением эффективной оценки состояния посевов является задача получения и использования данных высокого пространственного и временного разрешения [1]. Современные спутниковые наблюдения обеспечивают получение таких данных, но имеют ряд недостатков, связанных с оптикой, полосой пропускания или орбитальной конфигурацией, которые ограничивают оптимальные пространственно-временные характеристики. В ряде случаев, для получения оперативной информации необходимы временные рамки для оценки состояния развития и роста культур, приходится согласовывать получение снимков высокого пространственного разрешения, снятые при больших углах отклонения от надира, что приводит к значительным искажениям спектральной информации. Например, при использовании данных спутника Pleiades 1A (1B) приходится учитывать такие факторы, как полный цикл пролета по той же орбите - 26 дней. Чем меньше время пролета, тем больше угол обзора (съемки) – от  $\pm 20^{\circ}$  до  $\pm 47^{\circ}$  [2].

Одним из подходов, который предлагается для преодоления таких ограничений, является использование созвездия наноспутников, которые имеют преимущества временного пространственного разрешения и снимают территорию практически в надир [3].

Компания Planet Labs управляет крупнейшим созвездием наноспутниковой системы, которая предоставляет изображения в 4-х спектральных каналах с разрешением 3-4 м 2-3 раза в день и предоставляет возможность получения условно бесплатных данных в течение 14 дней.

**Анализ состояния вопроса и постановка проблемы.** С точки зрения мониторинга состояния посевов своевременная и практически ежедневная информация об условиях роста культур имеет очень важное значение для улучшения методов управления и оптимизации эффективности производства за счет получения устойчивых пространственных данных [4, 5]. Для мониторинга и оценки состояния посевов требуется информация в ближней инфракрасной области (NIR), наиболее чувствительной к изменениям плотности растительности, и представляющей плато отражения зеленой растительности [6]. Нормализованный разностный индекс растительности (NDVI), разработанный Rouse и Tucker [7, 8] показал, что он является простым, эффективным и широко используемым индикатором

пространственно-временных изменений роста и продуктивности растительности [9, 10]. Традиционные спутниковые данные с одного источника являются дорогостоящими и физически ограниченными с точки зрения пространственного разрешения и частоты получения изображений. Например, несмотря на высокое отношение сигнал / шум, радиометрическую точность и характеристики отражения, 10-дневный цикл приобретения данных Sentinel-2 представляет существенное ограничение для получения оценки критически важной во времени информации об изменении состояния растительности. И это без учета метеорологических условий, которые часто не позволяют приобретать данные в крайне необходимые даты. Улучшение пространственно-временной частоты мультиспектральных данных Sentinel-2 с пространственным разрешением 10-20 м, полностью эту проблему не решают. Одновременные требования к очень высокому пространственному разрешению (0,4 – 1,0 м) и частоте съемки в течение 3 - 4 дней в настоящее время обеспечиваются только путем целевого использования таких программируемых коммерческих мультисенсорных систем, как WorldView и Pleiades-1. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с установленными мультиспектральными камерами для мониторинга растительности, в целом также не решает эту проблему, так как съемка большой территории и последующая предварительная и тематическая обработка требуют достаточно много времени и финансовых затрат. Кроме того, крайне редко необходимо получение данных с пространственным разрешением несколько сантиметров. Наша практика работы в течении нескольких лет с данными, полученными различными мультиспектральными камерами, установленными на БПЛА, привела к выводу о том, что эти данные целесообразно применять только на небольших тестовых участках, что экономически затратно.

Основной задачей настоящего исследования является обоснование возможности и целесообразности использования изображений временного ряда PlanetScore для мониторинга посевов сельскохозяйственных культур. Необходимость проверки применения временного ряда PlanetScore для мониторинга растительности связана с тем, что недорогая конструкция датчиков модели CubeSat, основанная на матрицах с фильтрами Бауэра, в основном не соответствуют основным характеристикам спутниковых изображений, предоставляемых поставщиками спутниковой информации.

**Основная часть.** Возможности использования данных PlanetScore для мониторинга растительности были исследованы на сравнении с конкретными атмосферно скорректированными сценами Sentinel-2, которые обеспечили динамику изменения вегетационного индекса NDVI, рассчитанных по значениям внеатмосферного излучения (TOA Reflectance). Анализ карт NDVI на основе временных рядов данных в работе рассматривается в качестве одного из основных показателей состояния и развития растительности в период интенсивного накопления биомассы. Кроме того, это позволяет свести к минимуму несоответствия данных отдельных сенсоров PlanetScore, полученных в различное время при разном влиянии атмосферных условий.

Для исключения изменения значений NDVI, возникающих между приобретениями данных PlanetScore и Sentinel-2, использовались только данные, полученные в один день или с разницей в один день. Важной задачей было создание общих методов оперативной обработки данных, позволяющих переводить временные ряды необработанных изображений в последовательные и атмосферно скорректированные оценки NDVI PlanetScore и Sentinel-2.

В качестве тестовых участков использовалась территория НУБиП Украины – производственное подразделение «Агрономическая опытная станция». Почвы на территории участков в значительной мере представлены лугово-черноземной карбонатной крупнопылевато-легкосуглинистой почвой на лессовидном суглинке (агрогруппа 121 г). Общая площадь участка по репрезентативности соответствует требованиям, указанным в работе [11]. Данные, использованные для этого исследования, были собраны в период с 6 мая по 02 июня 2018 года. В течение периода исследований тестовые участки представлены культурой озимой пшеницы с повторением многолетних норм внесения удобрений (1 вариант

– фон, последствие органических удобрений; 4 вариант – фон+1 NPK; 6 вариант – фон+1,5 NPK; 11 – NPK; 12 – контроль без удобрений), (рис.1).

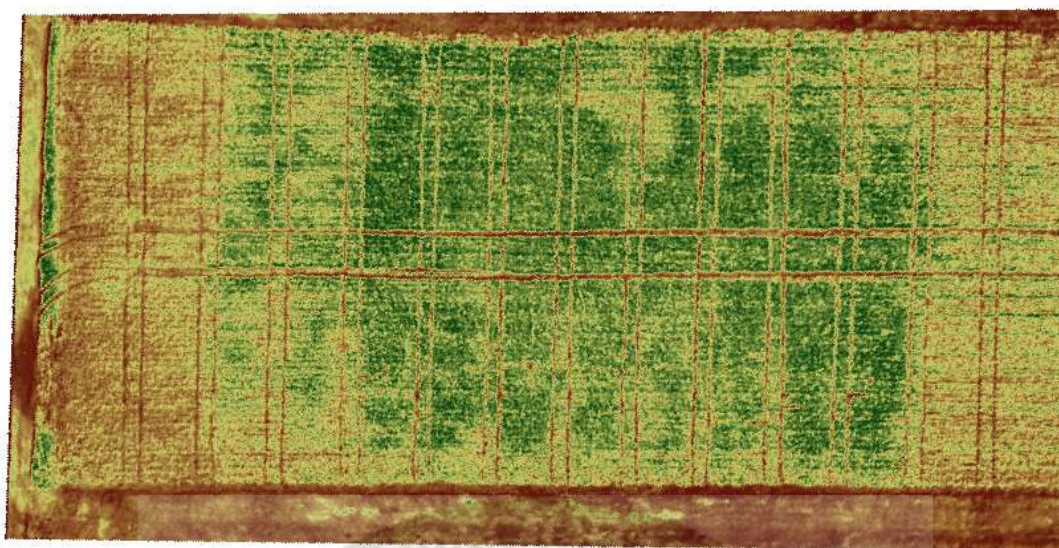


Рис. 1. Площадь исследований, состоящая из 12 участков, снимок Parrot Sequoia

*Спутниковые данные.* В данном исследовании использовались изображения Planet Scope и Sentinel-2. Характеристики условий съемки и спектральных каналов представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Используемые в исследовании данные PlanetScope и Sentinel-2

Дата съемки	PlanetScope		Sentinel-2	
	Время съемки	Угол стояния Солнца (град)	Время съемки	Угол стояния Солнца (град.)
05.06	08:24:02	51.8	09:05:52	55.70
05.08	-	-	09:04:48	55.74
05.10	08:08:32	51.2	-	-
05.11	-	-	09:05:56	57.03
05.12	08:23:23	53.1	09:05:20	57.03
05.23	-	-	09:04:20	59.15
05.24	08:24:08	55.6	-	-
05.26	-	-	09:03:27	60.20
05.28	08:25:05	56.2	08:28:58	59.91
06.02	08:24:58	56.8	09:05:40	60.55

Таблица 2

Характеристика спектральных каналов PlanetScope и Sentinel-2 [15]

Спектральный канал	PlanetScope		Sentinel-2	
	Среднее значение (нм)	Ширина (нм)	Среднее значение (нм)	Ширина (нм)
Голубой	485	60	490	65
Зеленый	545	90	560	35
Красный	630	80	665	30
Ближний инфракрасный	820	80	842	115

В исследованиях использованы изображения PlanetScore, которые поставляются в форматах «AnalyticMS.tif» и «AnalyticMS\_SR.tif».

В связи с тем, что исходные данные PlanetScore поставляются в сжатом формате LZW, изображения сначала были преобразованы в формат .img (рис. 2). Далее снимки Planet Score переведены во внеатмосферное излучение на сенсоре TOA (Top of Atmosphere Radiances). Алгоритм для осуществления калибровки снимков и расчета NDVI выполнен на языке программирования Python.



Рис. 2.: а) исходные (20180504\_082455\_1027\_3B\_AnalyticMS.tif) данные; б) импортированные в формат .img (20180504\_082455\_1027\_3B.img) данные Planet Score на территорию исследований

Расчеты выполнены по формуле [16]:

$$TOA(i) = 0.01 * DN(i) * reflectanceCoefficient(i), \quad (1)$$

где TOA(i) – значение излучения на сенсоре спутника, DN(i) – цифровые значения канала, reflectanceCoefficient(i) – коэффициент отражения (поставляется в метаданных), 0,01 – радиометрический масштабный коэффициент.

В исследованиях использованы изображения спектральных каналов Sentinel-2, по которым выполнен расчет индекса NDVI [7, 8]. Выбор индекса обоснован тем, что полученные данные представлены в период интенсивного развития наземной биомассы растений и данный индекс имеет высокую эффективность. Расчеты выполнены по формуле:

$$TOAs = \frac{0.01 * CN(i,j) * \pi d^2}{ESUN * \cos(90 - \theta)}, \quad (2),$$

где TOAs – отраженное от поверхности излучение на входе сенсора ( $W/m^2 * sr * \mu m$ ); CN(I,j) – цифровое значение пикселя изображения;  $\pi = 3,14$ ; d – расстояние Земля-Солнце; ESUN – солнечное излучение на границе атмосферы для i-спектрального канала;  $\theta$  – угол стояния Солнца в момент съемки.

Для сравнения результатов спектрального отражения был построен временной ряд значений индекса NDVI по данным PlanetScore и Sentinel-2. Для соответствия сравнения данных выполнено преобразование пространственного разрешения данных. Использование индекса NDVI обосновано тем, что полученные данные представлены в период интенсивного развития наземной биомассы растений и данный индекс имеет высокую эффективность [12] (рис. 3, 4).



Рис. 3. Величина вегетационного индекса NDVI в зависимости от даты съемки и варианта опыта по данным PlanetScore

Среднее значение вегетационного индекса NDVI и стандартное отклонение для данных PlanetScore и Sentinel-2 изображены на рис. 5. По данным описательной статистики стандартное отклонение величины вегетационного индекса от среднего составило 0,08 для



Рис. 4. Величина вегетационного индекса NDVI в зависимости от даты съемки и варианта опыта по данным Sentinel-2

PlanetScore и 0,10 для Sentinel-2, минимальное и максимальное значение - 0,38-0,71 и 0,46-0,81 соответственно, коэффициент варьирования для значений индекса был достаточно высок и составил 14,5 и 14,7%. Полученные данные свидетельствуют, что применение в исследовании упрощенных методов калибровки в целом способствует их использованию для мониторинга посевов сельскохозяйственных культур, но не обеспечивает возможности точной оценки состояния по фазам роста и развития.

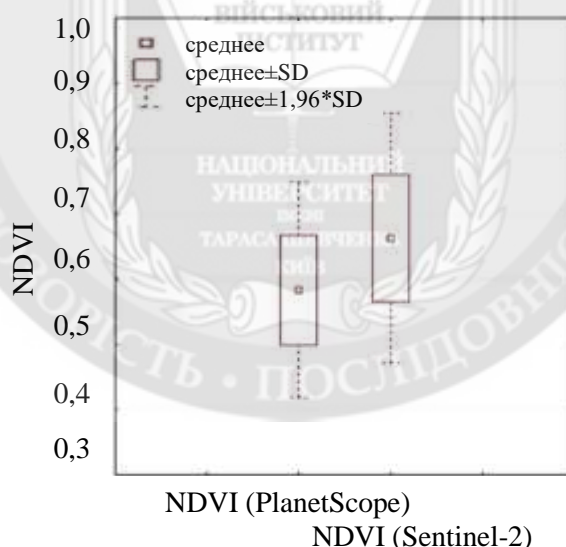


Рис. 5. Графическое изображение элементов описательной статистики для вегетационных индексов

В исследовании показано, что для преодоления ограничения данных PlanetScore, обусловленных использованием матриц с фильтрами Бауэра, по данным Sentinel-2, достаточно эффективен. Предсказуемость NDVI была лучше, когда данные Sentinel-2 получены одновременно или с разницей в 1-2 дня с данными PlanetScore. Изображения NDVI по данным PlanetScore были объединены с разрешением Sentinel-2 для последовательного сопоставления по пикселям. Несмотря на то, что были предприняты меры для обеспечения точной совместной регистрации изображений на основе сдвига пикселей и сопоставления колонок и строк, различия между агрегацией пикселей и методом передискретизации кубической

свертки Sentinel-2, вероятно, повлияли на сопоставимость результатов, особенно на границах участков. В результате точность предсказания была оценена по наиболее результативному большинству (т. е. 80%) данных. На уровне точности могут влиять количество дней между приобретением PlanetScope, изображением Sentinel-2 и расчетом NDVI, используемым для проверки прогнозов. Очевидно, что данная связь не является универсальной, и будет зависеть от временных и пространственно изменяющихся характеристик поверхности. Можно предположить, что рассмотренный подход применим к различным условиям и характеристикам окружающей среды или поверхности, и будет мало влиять на производительность алгоритма.

**Выводы.** Созвездие спутников PlanetScope позволяет получать достаточно достоверную информацию для мониторинга поверхности.

Сравнение значений NDVI, рассчитанных по атмосферно скорректированным данным PlanetScope и Sentinel-2, позволяет их использовать для создания временных рядов оценки состояния сельскохозяйственных культур на больших территориях. Предложенный подход использования данных спутников Planet и Sentinel-2 делает его масштабируемым и воспроизводимым для других регионов исследований. Предлагаемый подход может быть применен как дополнительный инструмент, позволяющий сократить финансовые и временные ресурсы при использовании данных бесплатных и коммерческих спутников, а также данных БПЛА, для решения задач мониторинга состояния посевов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Berni J. Thermal and Narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. /J. Berni, P.J. Zarco-Tejada, L. Suarez, E. Fereres. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2009. № 47. pp. 722–738.
2. Pléiades Imagery User Guide. AIRBUS DEFENCE and SPACE. 2012. URL: <https://www.intelligence-airbusds.com/en/4572-pleiades-technical-documents> (дата обращения 21.05.2015)
3. Esper J. NASA-GSFC Nano-satellite technology for Earth Science missions / J. Esper, P.V. Panetta, M. Ryschkewitsch, W. Wiscombe. Acta Astronaut. 2000. № 46. pp. 287–296.
4. Zhang N. Precision agriculture –A worldwide overview /N. Zhang, M. Wang, N. Wang. Comput. Electron. Agric. 2002. № 36. pp. 113–132.
5. Gebbers R. Precision agriculture and food security / R. Gebbers, V.I. Adamchuk, Science. 2010. № 327. pp. 828-831.
6. Asner G.P. Biophysical and Biochemical sources of variability in canopy reflectance. Remote Sens. Environ. 1998. № 64, pp.234–253.
7. Rouse J. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. /J. Rouse, R. Haas, j. Schell, D. Deering. In Proceedings of the Third ERTS-1 Symposium NASA SP-351, Washington, DC, USA, 10-14 December 1973. pp. 309–317.
8. Tucker C.J. Red and photographic Infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sens. Environ. 1979. № 8, pp.127–150.
9. Candiago S. Evaluating Multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images / S. Candiago, F. Remondino, M. De Giglio, m. Dubbini, M. Gattelli. Remote Sens. 2015, 7, pp. 4026–4047.
10. Gitelson A.A. Relationship between fraction of radiation absorbed by photosynthesizing maize and soybean canopies and NDVI from remotely sensed data taken at close range and from MODIS 250 m resolution data. / A.A. Gitelson, Y. Peng, K.F. Huemmrich. Remote Sens. Environ., 2014, 147, pp.108–120.
11. Попов М.А. Методология оценки точности классификации объектов на космических изображениях. Проблемы управления и информатики. 2007. №1. С. 97–103.
12. Кохан С.С., Востоков А.Б. Интеллектуальный анализ пространственных данных в агрофере. Монография: Киев. ЦП «Компринт», 2016, 310 с.

#### REFERENCES:

1. Berni J. Thermal and Narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. /J. Berni, P.J. Zarco-Tejada, L. Suarez, E. Fereres. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2009. № 47. pp. 722–738.

2. Pléiades Imagery User Guide. AIRBUS DEFENCE and SPACE. 2012. URL: <https://www.intelligence-airbusds.com/en/4572-pleiades-technical-documents> (date of reference 21.05.2015)
3. Esper J. NASA-GSFC Nano-satellite technology for Earth Science missions / J. Esper, P.V. Panetta, M. Ryschkewitsch, W. Wiscombe. Acta Astronaut. 2000. № 46. pp. 287-296.
4. Zhang N. Precision agriculture – A worldwide overview /N. Zhang, M. Wang, N. Wang. Comput. Electron. Agric. 2002. № 36. pp. 113–132.
5. Gebbers R. Precision agriculture and food security / R. Gebbers, V.I. Adamchuk, Science. 2010. № 327. pp. 828–831.
6. Asner G.P. Biophysical and Biochemical sources of variability in canopy reflectance. Remote Sens. Environ. 1998. № 64, pp.234–253.
7. Rouse J. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. /J. Rouse, R. Haas, j. Schell, D. Deering. In Proceedings of the Third ERTS-1 Symposium NASA SP-351, Washington, DC, USA, 10-14 December 1973, pp. 309–317.
8. Tucker C.J. Red and photographic Infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sens. Environ. 1979. № 8, pp.127–150.
9. Candiago S. Evaluating Multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images / S. Candiago, F. Remondino, M. De Giglio, m. Dubbini, M. Gattelli. Remote Sens. 2015, 7, pp. 4026–4047.
10. Gitelson A.A. Relationship between fraction of radiation absorbed by photosynthesizing maize and soybean canopies and NDVI from remotely sensed data taken at close range and from MODIS 250 m resolution data / A.A. Gitelson, Y. Peng, K.F. Huemmrich. Remote Sens. Environ., 2014, 147, pp.108–120.
11. Popov M.A. Methodology for assessing the accuracy of classification of objects in space images. Problems of management and computer science. 2007. №1. С. 97–103.
12. Kokhan S.S. Intellectual analysis of spatial data in agrosphere / Kokhan S.S., Vostokov A.B. Monograph: “Komprint”, 2016, 310 p.

д.т.н., доц. Кохан С.С., с.н.с. Востоков А.Б.

## ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ НАНОСУПУТНИКІВ PLANETSCOPE ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ПОСІВІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

*В статті розглянуто використання даних наносупутників PlanetScore, що виконують зйомку поверхні Землі 2-3 рази на день з просторовим розрізненням 3-4 м у чотирьох спектральних діапазонах, для моніторингу стану посівів сільськогосподарських культур. Здійснено порівняльний аналіз зображень часового ряду вегетаційних індексів NDVI, одержаних за даними наносупутників PlanetScore, та вегетаційних індексів (BI), одержаних на основі Sentinel-2. Часовий ряд даних дистанційного зондування Землі сформований на основі багатоспектральних зйомок супутників впродовж періоду інтенсивного наростання вегетативної біомаси озимої пшениці.*

*За даними вегетаційних індексів NDVI, розрахованих за значеннями позаатмосферного випромінювання на основі сцен PlanetScore і Sentinel-2, встановлені асоціації, які дозволяють звести до мінімуму невідповідності крос-сенсорів PlanetScore з даними сенсорів Sentinel-2 для різних умов зйомки. При цьому важливими чинниками виступають мінімальні зміни значень NDVI, що характеризують стан культур, у зв'язку з мінімальними часовими рамками одержання даних. Це дозволяє розробити алгоритм автоматизованого переведення сирих даних часових рядів у послідовні й атмосферно скориговані значення NDVI. Алгоритм дозволяє використовувати дані PlanetScore для створення часових рядів вегетаційних індексів та оцінки стану посівів сільськогосподарських культур на невеликих за площею ділянках, зокрема для фермерських господарств.*

*Ключові слова: PlanetScore; Sentinel-2; NDVI; наносупутники; атмосфера корекція.*

THE USE OF PLANETSCOPE NANOSATELLITE DATA FOR MONITORING STATUS OF AGRICULTURAL CROPS

*The article discusses the use of data from PlanetScope nanosatellites, which provide obtaining images of the Earth's surface 2-3 times a day with a spatial resolution of 3-4 m in four spectral bands, for monitoring crop status. A comparative analysis of NDVI vegetation indices time series obtained from the data of PlanetScope nanosatellites and vegetation indices (VI) based on Sentinel-2 has been carried out. The time series remote sensing data is performed using multispectral satellite images obtained during the period of intensive growth of vegetative biomass of winter wheat.*

*According to the values of NDVI vegetation indices, calculated from the non-atmospheric radiation based on PlanetScope and Sentinel-2 scenes, associations have been established to minimize the mismatch of PlanetScope cross-sensors with Sentinel-2 sensor data for different conditions of image acquisition. At the same time, important indicators are the minimum changes in the NDVI values that characterize the crop status due to the minimum period for obtaining data. This allows developing algorithm of automated recalculation of raw data of time series in coherent and atmospherically corrected NDVI values. The algorithm allows using PlanetScope data to create time series data and assess the status of crops within small-scale areas, especially for farms.*

*Keywords: PlanetScope; Sentinel-2; NDVI; nanosatellites; atmospheric correction.*

