

УДК 528.88:630*241

DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-86-94

Оценка влияния освещенности на значения вегетационных индексов природно-антропогенных объектов

Д. В. Филиппов¹✉

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научный геоинформационный центр Российской академии наук (НГИЦ РАН), г. Москва, Российская Федерация

e-mail: Gislabs@ngic.ru

Аннотация. В работе рассмотрен вопрос влияния величины освещения ландшафта на значения его вегетационного индекса NDVI. Исследование производилось на полях сельскохозяйственного назначения в Волгоградской области. В качестве материалов дистанционного зондирования применялись архивные материалы мульти- и гиперспектральной космической съемки, выполненной космическим аппаратом «Ресурс-П». Исследование показало, что значение вегетационного индекса NDVI неравномерно изменяется на космических изображениях одного и того же объекта, полученных в один и тот же временной интервал суток при разных условиях освещения. Для более глубокого изучения вопроса влияния условий освещения на значения вегетационных индексов ландшафта было предложено рассмотреть возможность применения БПЛА или создания специального лабораторного моделирующего комплекса для выполнения дистанционных спектрометрических исследований растительного покрова.

Ключевые слова: космическая съемка, вегетационные индексы, освещенность, космические снимки

Для цитирования:

Филиппов Д. В. Оценка влияния освещенности на значения вегетационных индексов природно-антропогенных объектов // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 3. – С. 86–94. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-86-94

Введение

Для изучения природных ландшафтов применяются методы космической и авиационной мультиспектральной цифровой съемки. Как известно, цифровое изображение ландшафта получается в результате регистрации матрицей или ПЗС-линейкой отраженного светового потока от ландшафта при его освещении и собственном излучении объекта в инфракрасном (ИК) диапазоне. В связи с этим задача оценки влияния освещенности ландшафта на значения его вегетационных индексов является актуальной для научных исследований [1]. В формировании мультиспектрального изображения ландшафта участвует также собственное излучение объектов ландшафта в ИК зоне спектра. При использовании космических систем поток отраженной радиации от подстилающего ландшафта проходит через слои атмосферы. В ней происходит поглощение, рассеяние и отражение проходящего через них потока солнечной

радиации, отраженной от подстилающего ландшафта (рис. 1). И на входе в приемник космической системы получается поток суммарной отраженной радиации от объекта и слоев атмосферы, а также собственное излучение в ИК диапазоне от объектов [2, 3].

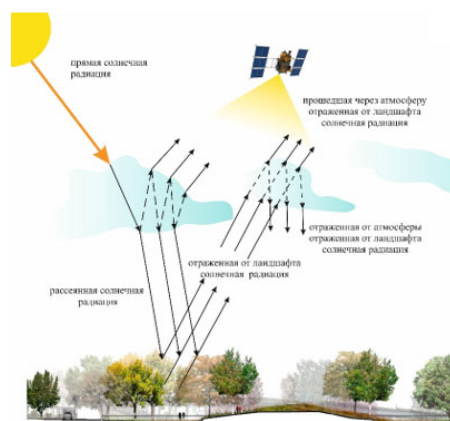


Рис. 1. Схема формирования отраженной энергии от ландшафта

Величина освещенности ландшафта при съемке определяется не только временем съемки, но и климатическими параметрами, например, такими, как плотность облачного покрова. Величина солнечной освещенности ландшафта оказывает влияние на спектральную разрешающую способность съемочной системы и полученных цифровых изображений [4, 5]. Исследования показали, что самая высокая разрешающая способность достигалась в районе полудня, т. е. в интервал времени, когда солнечная освещенность была максимальной. Полученные результаты необходимо учитывать при выполнении мультиспектральной съемки для расчета вегетационных индексов.

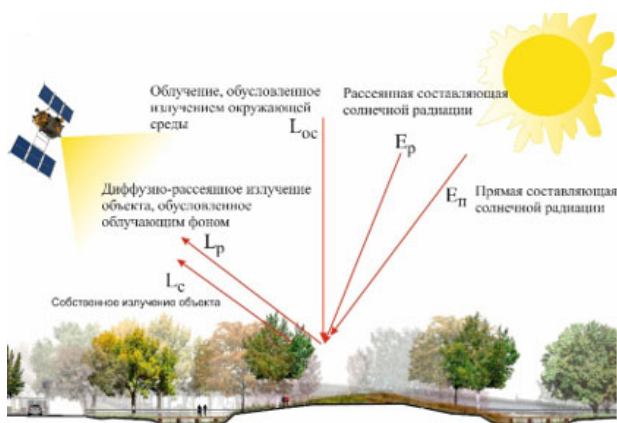


Рис. 2. Формирование ИК излучения природного объекта

Из рис. 2 видно, что общая спектральная плотность энергетической яркости объекта определяется как сумма диффузно-рассеянного излучения объекта (L_p), обусловленного облучающим фоном, и собственного излучения объекта (L_c) [6]:

$$L_{\Sigma}^{\Delta\lambda} = L_p^{\Delta\lambda} + L_c^{\Delta\lambda}, \quad (1)$$

где $\Delta\lambda$ – диапазон длин волн

$$L_c^{\Delta\lambda} = \varepsilon_o^{\Delta\lambda} \cdot L_o^{\Delta\lambda}(t_o), \quad (2)$$

$$L_p^{\Delta\lambda} = (1 - \varepsilon_o^{\Delta\lambda}) \cdot L_{обл}^{\Delta\lambda}(t), \quad (3)$$

где $\varepsilon_o^{\Delta\lambda}$ – коэффициент теплового излучения (КТИ) объекта для заданного спектрального

диапазона $\Delta\lambda$; $L_o^{\Delta\lambda}(t_o)$ – энергетическая яркость абсолютно черного тела при температуре объекта t_o в заданном спектральном диапазоне $\Delta\lambda$; $L_{обл}^{\Delta\lambda}(t)$ – диффузно-рассеянное излучение, обусловленное естественным фоновым излучением в заданном спектральном диапазоне $\Delta\lambda$.

Из формул (1) и (3) видно, что суммарная энергетическая яркость объектов ландшафта зависит от их температуры. Температура же этих объектов зависит от суммарной падающей на них солнечной радиации E_{Σ}

$$E_{\Sigma} = E_p + E_{п}, \quad (4)$$

где E_p – рассеянная составляющая солнечной радиации; $E_{п}$ – прямая составляющая солнечной радиации (см. рис. 2).

Исходя из полученных результатов была определена задача исследовать возможное влияние величины освещенности природно-антропогенных объектов на значения их вегетационных индексов. Исследование показало, что предположение о влиянии величины освещенности ландшафта на значение его вегетационных индексов имеет право на существование, однако для более точных выводов необходимо провести ряд дополнительных исследований. На сегодняшний день во многих современных технологиях автоматизированной классификации мультиспектральных изображений по-прежнему используется метод расчета вегетационных индексов [2]. Вегетационные индексы получаются в результате операций с разными спектральными каналами мультиспектрального изображения и характеризуют параметры растительности в данном пикселе снимка. В большинстве случаев это каналы красного и инфракрасного диапазонов спектра [7].

Как вариант для дальнейших исследований была разработана программа полевых исследований с помощью беспилотного летательного аппарата, но из-за высокой стоимости съемки с БПЛА было принято решение использовать материалы космической съемки. Кроме мультиспектральных косми-

ческих снимков высокого разрешения были использованы гиперспектральные снимки среднего разрешения.

Постановка задачи

Для исследований был выбран наиболее распространенный вегетационный индекс для природных ландшафтов – NDVI [8]. Расчет и применение этого и других вегетационных индексов были ранее рассмотрены во многих научных трудах [8–13]. Значения индекса NDVI лежат в диапазоне от –1 до 1 [14–16], однако если с диапазоном значений этого индекса все определено, то с соотношением его значений и самим ландшафтом не все так ясно. Отрицательные значения индекса NDVI во всех источниках относят к поверхностям, не покрытым растительностью. С положительными же значениями не все так однозначно. В некоторых источниках указывается, что значение NDVI, равное 0,5, является признаком разреженной растительности [17], в то время как в другом источнике говорится, что диапазон 0,3–0,5 показывает самый высокий показатель для растительности [18–20]. В других источниках указано, что диапазон 0,2–0,3 представляют кустарники и луговая растительность [21], а диапазон значений 0,4–0,6 является показателем умеренной биомассы растительного покрова [22, 23]. В ходе выполнения исследования необходимо было проанализировать влияние плотности облачного покрова атмосферы и, как следствие, величины освещенности природных ландшафтов на значения индекса NDVI.

Расчет вегетационного индекса выполнялся по двум типам объектов: поля с преобладанием открытого грунта и с произрастающими сельскохозяйственными культурами. Необходимо было сравнить результаты расчета NDVI по мульти- и гиперспектральным снимкам, полученным при различной плотности облачного покрова.

Выбор материалов для исследования

Выбранный для исследования вегетационный индекс, показывающий наличие и состояние растительности (относительную биомассу) [7, 19, 21], сформировал требования по спектральному диапазону работы, предъявляемые

для регистрирующей аппаратуры космических систем:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}. \quad (5)$$

Регистрирующие системы должны были позволять получать информацию в видимом спектре излучения, а также в ближнем (~0,75–1,4 мкм) и среднем (~1,4–3 мкм) ИК диапазонах. В качестве космических мультиспектральных данных использовались архивные снимки, полученные космическим аппаратом (КА) «Ресурс-П» оптико-электронной аппаратурой «Геотон-Л1». В качестве района исследования был выбран участок Волгоградской области, включающий в себя территории с искусственным орошением почв.

В работе использовались архивных материалы космических съемок, поэтому участок выбирался из расчета наличия на его территорию не менее двух маршрутов КА «Ресурс-П» при различной плотности облачного покрова. Маршруты съемки должны были быть сделаны с интервалом не более 5 дней, что обеспечивает относительно идентичную вегетационную фазу растений. Снимки подбирались на геопортале Роскосмоса (<https://gptl.ru>) на основе пространственных данных о территории. По результатам визуального дешифрирования космических снимков была выбрана территория, на площадь которой были снимки с высокой плотностью облачного покрова (дата съемки 02.08.2018, облачность 17 %) и низкой (дата съемки 05.08.2018, облачность 0 %) (таблица). Разная плотность облачного покрова на изображениях обеспечила разность величины освещенности в поле объекта при съемке.

Параметры космических снимков

Номер снимка	Плотность облачного покрова, %	Дата съемки
Гиперспектральная съемочная аппаратура (ГСА)		
8718	28605	0 18:33 05.08.2018
8672	28560	17 20:00 02.08.2018
Многозональная высокодетальная аппаратура («Геотон-Л1»)		
8718	28605	0 10:46 05.08.2018
8672	28560	17 10:41 02.08.2018

Пространственное разрешение мультиспектральных снимков составляет примерно 2–

3 м, гиперспектральных – примерно 30 м. Выбранные участки условно можно разделить на четыре группы по типу природно-антропогенного ландшафта: водная поверхность, городская территория, сельскохозяйственные земли с преобладанием открытого грунта и лесная растительность. Для расчета вегетационных индексов была произведена коррективировка совмещения космических изображений в разных спектральных каналах. На рис. 3 представлены индексные изображения распределения индекса NDVI на сельскохозяйственных полях.

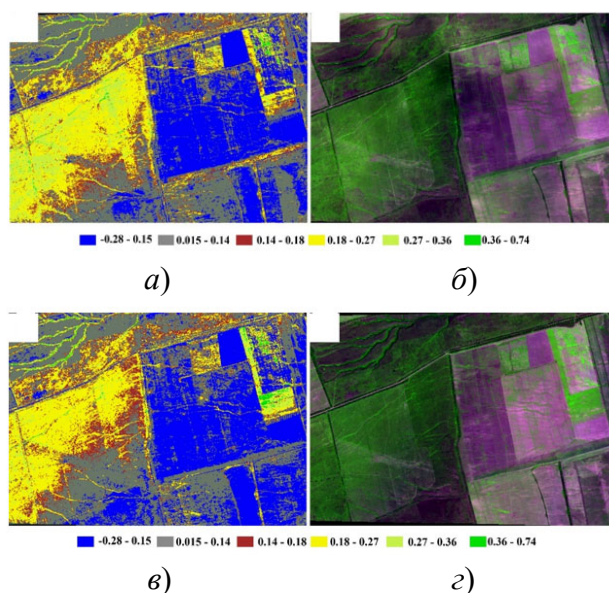


Рис. 3. Индексное изображение NDVI и фрагмент космического снимка в системе RGB на участок с сельскохозяйственными землями: а), б) дата съемки 02.08.2018, облачность 17 %; в), г) дата съемки 05.08.2018, облачность 0 %

Предполагалось, что с увеличением плотности облачного покрова снижается освещенность ландшафта и значения индекса NDVI будут изменяться равномерно в сторону уменьшения или увеличения, однако обратим внимание на распределение значений NDVI. На рис. 4 выделены два наиболее интересных поля, обозначенные цифрами 1 и 2.

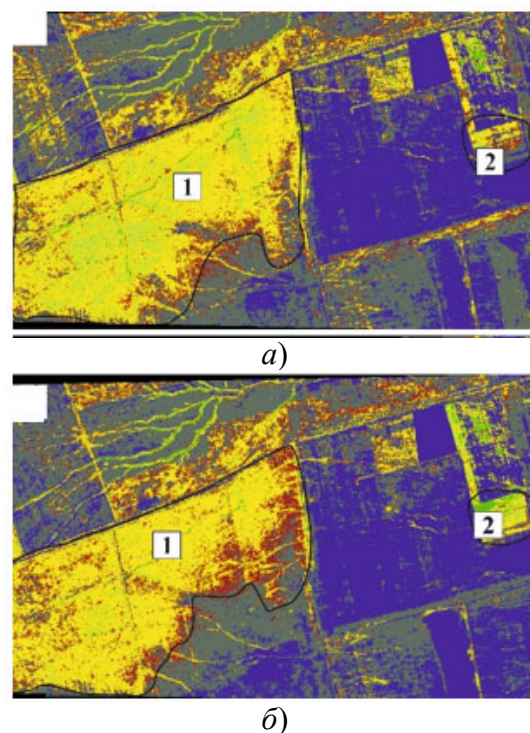


Рис. 4. Выделенные участки на индексном изображении NDVI: а) облачность 17 %; б) облачность 0 %

Общая тенденция изменения значений NDVI такова, что на снимке с более низкой плотностью облачного покрова индекс имеет более высокие значения, однако на выделенных областях можно заметить следующее. В области 2 значения NDVI более высокие на снимке с меньшей плотностью облаков. В тоже время в области 1 значения NDVI, наоборот, заметно снижены. Для объяснения такого поведения NDVI были построены спектральные профили ландшафта в нескольких выбранных точках (рис. 5).

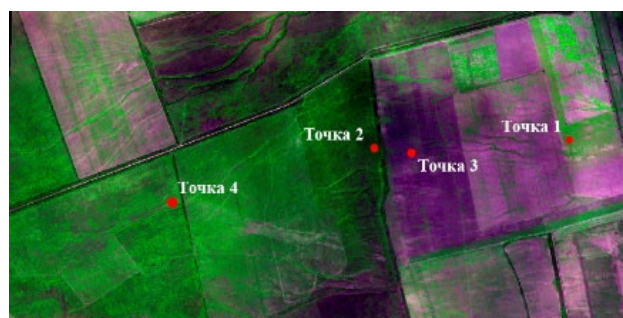


Рис. 5. Схема расположения точек для построения спектральных профилей ландшафта

Спектральные профили были построены по гиперспектральным снимкам «Ресурс-П» (рис. 6).

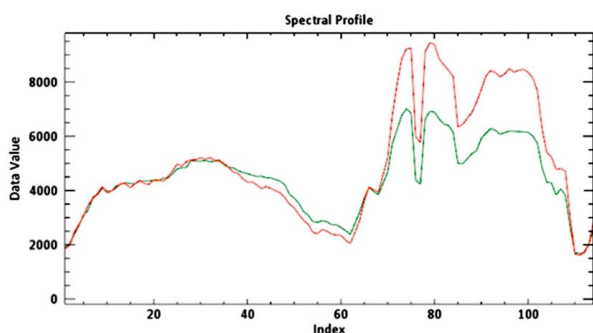


Рис. 6. Графики спектрального профиля, построенные по гиперспектральным снимкам «Ресурс-П», в точке № 1: красный – для снимка с облачностью 0 %, зеленый – для снимка с облачностью 17 %

Как видно из рис. 6, графики спектрального отклика природного ландшафта, полученные на разных гиперспектральных снимках, имеют следующую тенденцию. В зоне фиолетового и синего излучения графики практически совпадают, в то время как в зоне зеленого и желтого излучения (с 35 по 65 канал ГСА) график, полученный со снимка с плотностью облачного покрова в 17 %, имеет значения немного выше, чем на снимке с нулевым покровом облачности. В интервале же красного и ближнего ИК излучения значения графика, полученного по снимку с нулевым облачным покровом, значительно превышают значения, полученные по снимку с облачным покровом в 17 %. Как результат значения NDVI природного ландшафта (поле) в районе точки 1 на снимке с более плотным облачным покровом оказались ниже, чем на снимке с нулевой облачностью.

Графики спектрального профиля снимков в точке 4 (рис. 7) практически совпадают друг с другом на протяжении фиолетового, синего, зеленого, желтого участка спектра, и только в красном и ближнем ИК участке спектра значения графика спектрального профиля снимка с облачностью 0 % превышают значения графика снимка с 17 % облачностью. Стоит заметить, что это превышение не столь ярко выражено, как в точке 1. Отсюда получаем значения

NDVI по снимку с облачностью 0% ниже, чем по снимку с облачностью 17 %.

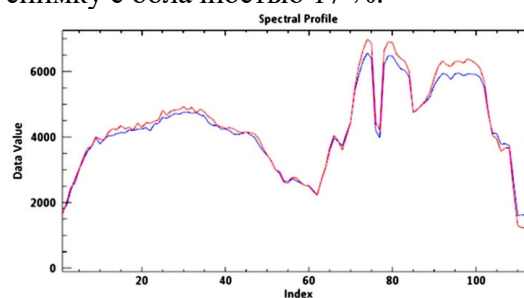


Рис. 7. Графики спектрального профиля, построенные по гиперспектральным снимкам «Ресурс-П», в точке № 4: красный – для снимка с облачностью 0 %, синий – для снимка с облачностью 17 %

В точках 2 и 3 значения графиков спектральных профилей снимка с облачностью 0 % превышают значения графика снимка с облачностью 17 %, что дает незначительное преобладание значений NDVI при нулевой облачности (рис. 8, 9).

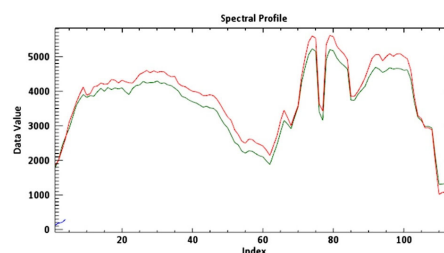


Рис. 8. Графики спектрального профиля, построенные по гиперспектральным снимкам «Ресурс-П», в точке № 2: красный – для снимка с облачностью 0 %, зеленый – для снимка с облачностью 17 %

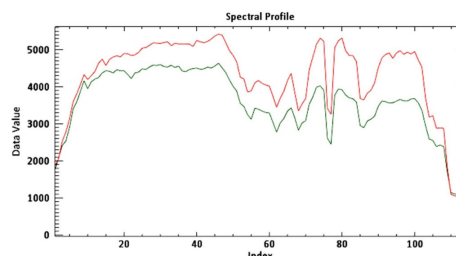


Рис. 9. Графики спектрального профиля, построенные по гиперспектральным снимкам «Ресурс-П», в точке № 3: красный – для снимка с облачностью 0 %, зеленый – для снимка с облачностью 17 %

Результаты

Результаты расчета значения индекса NDVI показали, что величина освещенности поверхности влияет как на величину отраженной энергии от природного ландшафта в видимом диапазоне, так и на величину его излучения в ближнем ИК диапазоне. При этом влияние имеет неравномерный характер, что приводит к изменению значений NDVI.

Снимки были выполнены в один и тот же суточный интервал, а разница в датах съемки не превышала трех дней, что позволило исключить возможность существенного изменения вегетационного состояния растительного покрова. Также стоит отметить, что в работе использовались участки, не подвергавшиеся механической обработке (вспашка, покос и т. п.) в указанный интервал.

Обсуждение результатов

Величина освещенности ландшафта меняется не только от плотности облачного покрова, но и в течение суток. Поэтому для получения более достоверных результатов эксперимента необходимо постоянно измерять в области объекта следующие параметры: освещенность, температуру воздуха, влажность и температуру грунта, причем измерение должно происходить одновременно с фиксированием аппаратурой дистанционного зондирования спектрального изображения ландшафта. Выполнить эти условия при использовании космической съемки невозможно. Применение беспилотного летательного аппарата во много раз повысит достоверность получаемых результатов. Однако и

в этом случае есть свои нюансы, такие как выбор времени и даты съемки, погодные условия, удовлетворяющие задачам эксперимента.

Выводы

В результате исследований было установлено, что освещенность объекта влияет на значение вегетационного индекса, но полученные результаты показали, что изменение вегетационного индекса имеет неоднородную тенденцию в поле изображения ландшафта. На одних участках значения индекса увеличивались, а на некоторых, наоборот, уменьшались. Так как участки были выбраны на территории земель сельскохозяйственного назначения, то возможно, на значения индексов повлияла неоднородная степень увлажнения почвенного покрова, на что могут указывать значения яркостей снимков в ближней ИК зоне спектра (см. рис. 7, 8). Применение беспилотных летательных аппаратов, а также проведение полевых исследований в районе съемки позволили бы получить более точные результаты. Однако для количественной оценки влияния освещенности на значения вегетационных индексов необходимо максимально исключить влияние сторонних факторов.

Создать необходимые условия для выполнения спектрометрических исследований растительного покрова можно в специально подготовленном лабораторном комплексе. Актуальность такого комплекса была сформулирована Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Научным геоинформационным центром РАН (НГИЦ РАН) в ходе научно-исследовательских работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Асадов Х. Г., Керимов Н. И. К оценке влияния пылевого аэрозоля на точность измерения нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI // Российский журнал прикладной экологии. – 2019. – № 4. – С. 28–32. – EDN VGMKBY.
2. Филиппов Д. В., Чурсин И. Н., Рулёв Д. Д., Бояренкова А. Д. Применение методов комплексной обработки данных дистанционного зондирования Земли для изучения процессов окарбонирования почв с искусственным орошением // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28, № 1. – С. 80–91. – DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-1-80-91. – EDN CLTVKF.
3. Михеев С. В. Основы инфракрасной техники. – СПб. : Университет ИТМО, 2017. – 127 с. – EDN MLPOJV.
4. Филиппов Д. В., Рулев Д. Д., Чурсин И. Н. Исследование разрешающей способности цифровых изображений в различных диапазонах спектра // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 1. – С. 61–70. – DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-1-61-70. – EDN BWWUTC.
5. Филиппов Д. В., Рулев Д. Д., Чурсин И. Н. Исследование качества цифровых фотоизображений при различных условиях освещенности // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2020. – Т. 17, № 1. – С. 27–33. – DOI 10.14489/vkit.2020.01.pp.027-033. – EDN: CKTYQT.

6. Кучерин П. Н., Лопин В. И., Лопин А. В., Макаров О. Ю. Математическая модель формирования инфракрасного излучения объекта в условиях естественного фонового облучения // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5, № 9. – С. 137–140. – EDN KWCMOJ.
7. Ткач А. В., Гордиенко А. С. Исследование состояния окружающей среды в районе нефтеразработок по космическим снимкам // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 6. – С. 55–63. – DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-6-55-63. – EDN UURWSZ.
8. Филиппов Д. В., Тарнопольский Л. А., Бояренкова А. Д. Исследование влияния освещенности на расчет вегетационных индексов на примере NDVI // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28, № 5. – С. 151–162. – DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-5-151-162. – EDN LGDDYV.
9. Tahir Ali Akbar, Quazi K. Hassan, Sana Ishaq, Maleeha Batool, Hira Jannat Butt and Hira Jabbar Investigative Spatial Distribution and Modelling of Existing and Future Urban Land Changes and Its Impact on Urbanization and Economy // Remote Sens. – 2019. – 11 (105). – P. 1–15. – DOI 10.3390/rs11020105.
10. Черепанов А. С., Дружинина Е. Г. Вегетационные индексы // Геоматика. – 2011. – Т. 2. – С. 98–102. – EDN STYTLN.
11. Гребень А. С., Красовская И. Г. Анализ основных методик прогнозирования урожайности с помощью данных космического мониторинга, применительно к зерновым культурам степной зоны Украины // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2012. – № 2. – С. 170–180.
12. Noomen M. F. Hyperspectral reflectance of vegetation affected by underground hydrocarbon gas seepage. – Wageningen University and Research, 2007. – 167 p.
13. Ковязин В. Ф., Ань Д. Т. Л., Хунг Д. В. Прогноз состояния растительного покрова лесных угодий заповедника Донг Най Вьетнама // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 214–228. – DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-3-214-228. – EDN CZWUNC.
14. Якутин М. В., Шарикалов А. Г. Экологическая обстановка на территории Муравленковского нефтегазового месторождения (Западная Сибирь, ЯНАО) по данным дистанционного зондирования // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 93–103. – DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-4-93-103. – EDN UNUKPN.
15. Верхотуров А. А., Мелкий В. А., Долгополов Д. В., Лисицкий Д. В. Мониторинг изменения состояния растительного покрова на участке трассы трубопровода проекта «Сахалин-2» по данным космических съемок // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 4. – С. 45–53. – DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-4-45-53. – EDN AROBFE.
16. Кулик Е. Н., Байкин Д. А. Разливы нефтепродуктов на водной поверхности: методы анализа данных дистанционного зондирования Земли при их выявлении // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 4. – С. 61–73. – DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-4-61-73. – EDN MRDABW.
17. Дистанционное зондирование Земли при эколого-геологических исследованиях [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.geol.vsu.ru/ecology/ForStudents/4Graduate/RemoteSensing/Lecture06.pdf> (дата обращения 24.04.2023).
18. Керимов И. А., Батукаев А. А. Вегетационные индексы растительности: Литературный обзор // Современные тенденции низкоуглеродного развития: глобальные и региональные аспекты : Материалы международной научной конференции, Грозный, 28 июня – 01 июля 2023 года. – Грозный : ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова, 2023. – С. 36–49. – DOI 10.26200/GSTOU.2023.39.35.037. – EDN TNSVUP.
19. Миков С. И. Вегетационные индексы. Основы, формулы, практическое использование // Цифровые технологии и бизнес : материалы 79-й студенческой научно-технической конференции, Минск, 17 мая 2023 г. / сост. М. Г. Карасёва. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 34–42.
20. Есхожин К. Д., Нукешев С. О. Оценка состояния растения с помощью вегетационного индекса NDVI // Материалы международной научно-практической конференции «Сейфуллинские чтения – 18(2): «Наука XXI века – эпоха трансформации». – 2022. – Т. 1, Ч. 1. – С. 215–218.
21. Что такое NDVI и его применение в сельском хозяйстве? [Электронный ресурс]. – URL: <https://agrosignal.com/articles/chto-takoe-ndvi-i-ego-primenenie-v-selskom-hozyajstve/?ysclid=luj-si69dml791982245> (дата обращения 04.06.2024).
22. Росайкина Е. А., Ивлиева Н. Г. Обработка данных дистанционного зондирования земли в гис-пакете ArcGIS // ОГАРЁВ-ONLINE. – 2015. – № 4 (45). – С. 1–9.
23. Галерея индексов ArcGIS [Электронный ресурс]. – URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/help/data/imagery/indices-gallery.htm> (дата обращения 10.06.2024).

Об авторах

Дмитрий Викторович Филиппов – кандидат технических наук, директор.

Получено 27.09.2024

© Д. В. Филиппов, 2025

Assessment of the influence of illumination on the values of vegetation indices of natural-anthropogenic objects

D. V. Filippov¹✉

¹ Federal State Budgetary Scientific Institution Scientific Geoinformation Center of the Russian Academy of Sciences (NGIC RAS), Moscow, Russian Federation

e-mail: Gislabs@ngic.ru

Abstract. The paper considers the issue of the influence of the magnitude of landscape illumination on the values of vegetation index NDVI. The study was carried out in agricultural fields in the Volgograd region. Archival materials of multi- and hyperspectral satellite imagery performed by the Resurs-P spacecraft were used as remote sensing materials. The study showed that the value of the vegetation index NDVI varies unevenly on satellite images of the same object obtained in and at the same time interval of the day under different lighting conditions. For a deeper study of the influence of lighting conditions on the values of vegetation indices of the landscape, it was proposed to consider the possibility of using UAVs or creating a special laboratory modeling complex to perform remote spectrometric studies of vegetation cover.

Keywords: satellite imagery, vegetation indices, illumination, satellite images

REFERENCE

1. Asadov, H. H., Kerimov, N. I. (2019). On estimation of effect of dust aerosol on accuracy of measurements of normalized difference vegetation index (NDVI). *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii [Russian Journal of Applied Ecology]*, 4, 28–32, EDN VGMKBY [in Russian].
2. Filippov, D. V., Rulev, D. D., Chursin, I. N. (2022). Implementation of complex methods of earth's remote sensing data processing for studying carbonation processes of soils with artificial irrigation. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 28(1), 80–91. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-1-80-91, EDN CLTVKF [in Russian].
3. Mikheev, S. V. (2017). *Osnovy infrakrasnoy tekhniki [Basics of infrared technology]*. Saint Petersburg: ITMO University, 127 p. EDN MLPOJV [in Russian].
4. Filippov, D. V., Rulev, D. D., Chursin, I. N. (2022). Investigation of digital images resolution in various spectral ranges. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27(1), 61–70. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-1-61-70 EDN BWWUTC [in Russian].
5. Filippov, D. V., Rulev, D. D., Chursin, I. N. (2020). Digital image quality under different light conditions research. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy [Bulletin of Computer and Information Technologies]*, 17(1), 27–33. DOI 10.14489/vkit.2020.01.pp.027-033 EDN: CKTYQT [in Russian].
6. Kucherin, P. N., Lopin, V. I., Lopin, A. V., & Makarov, O. Ju. (2009). Mathematical model formation of infra-red radiation of object in the conditions of the natural background irradiation. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Voronezh State Technical University]*, 5(9), 137–140 EDN KWCMOJ [in Russian].
7. Tkach, A. V., Gordienko, A. S. (2022). Investigation of the state of hydrographic objects in the area of oil production according to remote sensing of the Earth. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27(6), 55–63. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-6-55-63 EDN UURWSZ [in Russian].
8. Filippov D. V., Tarnopolsky L. A., Boyarenkova A. D. (2023). Investigation of the influence of illumination on the calculation of vegetation indices on the example of NDVI *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, Vol. 28, No 5, P. 151–162. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-5-151-162. EDN LGDDYV [in Russian].

9. Akbar, T. A., Hassan, Q. K., Ishaq, S., Batool, M., Butt, H. J., & Jabbar, H. (2019). Investigative spatial distribution and modelling of existing and future urban land changes and its impact on urbanization and economy. *Remote Sensing*, 11(2), 105, 1–15. DOI 10.3390/rs11020105.
10. Cherepanov, A. S., Druzhinina, E. G. (2011). Vegetation indices. *Geomatika*, 2, 98–102 EDN STYTTLN [in Russian].
11. Greben, A. S., Krasovskaya, I. G. (2012). Analysis of the main methods of forecasting yields using space monitoring data, in relation to grain crops of the steppe zone of Ukraine. *Radioelektronni i komp'yuterni sistemi [Radioelectronic and computer systems]*, 2, 170–180 [in Russian].
12. Noomen, M. F. (2007). *Hyperspectral reflectance of vegetation affected by underground hydrocarbon gas seepage*. Wageningen University and Research, 167 p.
13. Kovyazin, V. F., Anh, D. T. L., Hung, D. V. (2020). Predicting forest land cover changes of Dong Nai reserve, Vietnam. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(3), 214–228. DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-3-214-228 EDN CZWUNC [in Russian].
14. Yakutin, M. V., Sharikalov, A. G. (2019). Ecological situation on the territory of Muravlenko oil field (Western Siberia, YNAO) based on remote sensing data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(4), 93–103. DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-4-93-103 EDN UNUKPN [in Russian].
15. Verhoturov, A. A., Melkiy, V. A., Dolgoplov, D. V., & Lisitsky, D. V. (2022). Monitoring changes in the state of vegetation cover on the section of the Sakhalin-2 project pipeline route according to space imagery data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27(4), 45–53. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-4-45-53 EDN AROBFE [in Russian].
16. Kulik, E. N., Baikin, D. A. (2022). Oil spills on the water surface: methods of remote sensing data analysis for their identification. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27(4), 61–73. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-4-61-73 EDN MRDABW [in Russian].
17. Remote sensing of the Earth in ecological and geological studies Retrieved from <http://www.geol.vsu.ru/ecology/ForStudents/4Graduate/RemoteSensing/Lecture06.pdf> (accessed 24.04.2023) [in Russian].
18. Kerimov, I. A., Batukaev, A. A. (2023). Vegetation Indexes Review. In *Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Covremennye tendentsii nizkouglerodnogo razvitiya: global'nye i regional'nye aspekty» [Proceedings of the International Scientific Conference «Modern trends in Low-carbon Development: Global and regional aspects»]* (pp. 36–49). DOI 10.26200/GSTOU.2023.39.35.037 EDN TNSVUP [in Russian].
19. Mikov, S. I. (2023). Vegetation indices. Basics, formulas, practical use. In *Materialy 79-oy studencheskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii [Proceedings of the 79th Student Scientific and Technical Conference]* (pp. 34–42). Minsk: BNTU [in Russian].
20. Yeskhodzhin, D. Z., Nukeshev, S. O. (2022). Assessment of plant condition using the NDVI vegetation index. In *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Seifullinskie chteniya – 18(2): «Nauka XXI veka – epokha transformatsii» [Proceedings of the international scientific and practical conference «Seifullin readings - 18(2): "Science of the XXI century – the era of transformation»]* (pp. 215–218) [in Russian].
21. What is NDVI and its application in agriculture? Retrieved from <https://agrosignal.com/articles/chto-takoe-ndvi-i-ego-primeneniye-v-selskom-hozyajstve/?ysclid=lujisi69dml791982245> (accessed 04.06.2024) [in Russian].
22. Rosyaikina, E. A., Ivlieva, N. G. (2015). Processing of remotely sensed data by means of ArcGIS software. *OGAREV – ONLINE*, 4(45), 1–9 [in Russian].
23. The gallery of the ArcGIS indexes Retrieved from <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/help/data/imagery/indices-gallery.htm> (accessed 10.06.2024) [in Russian].

Authors details

Dmitry V. Filippov – Ph. D., Director.

Received 27.09.2024

© D. V. Filippov, 2025