

Влияние условий наблюдения на точность расчёта вегетационного индекса растительности NDVI по данным дистанционного зондирования Земли

А. И. Алексанин^{1,2}, А. Н. Тимофеев²

¹ *Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия*

² *Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690922, Россия
E-mail: alexs@iacp.dvo.ru*

Рассматриваются вопросы точности расчёта нормализованного вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) по спутниковым данным. Сравняются значения индекса, рассчитанного алгоритмом пакета программ SeaDAS по данным радиометра MODIS/Aqua (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), со значениями, полученными на полигоне Ла-Кро (Франция, *фр.* La Crau) за семь лет. Полигон находится вблизи побережья Средиземного моря и представляет собой плоское поле, на котором растёт трава. Измерения проводятся автоматической фотометрической станцией. Расчёты показывают близость спутниковых и полигонных измерений: систематическое рассогласование — 0,005; стандартное отклонение — 0,03. Используемый алгоритм не учитывает влияние аэрозоля на величину NDVI. Тем не менее погрешности, обусловленные отсутствием учёта аэрозоля, лежат в пределах общей погрешности расчётов. Наблюдается незначительная зависимость погрешности от зенитного угла солнца, который изменялся в диапазоне от 20 до 70°. Двухлучевая функция отражательной способности поверхности на полигоне однородна, за исключением направлений, близких к солнечному зайчику. Измерения были далеки от зоны солнечного зайчика. Тем не менее точность расчёта зависит от разницы азимутального угла съёмки полигона с азимутом на солнце. Значительными оказались рассогласования NDVI, обусловленные различиями центральных волновых чисел разных спутников. Сравнение проводилось для следующих радиометров: MODIS/Aqua, Landsat-8/OLI-1 (*англ.* Operational Land Imager), Landsat-9/OLI-2, «Канопус-В»/MCC.

Ключевые слова: вегетационный индекс NDVI, погрешности расчётов, атмосферная коррекция изображений, MODIS/Aqua

Одобрена к печати: 29.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-133-143

Введение

Определение состояния растительности дистанционными методами — актуальная задача при реализации различных хозяйственных работ и контроле окружающей среды. Для этих целей широко используется нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), рассчитываемый на основе данных красного и ближнего инфракрасного каналов. Точность его расчёта по спутниковым данным существенно влияет на получаемые результаты. Существуют различные аспекты, приводящие к погрешностям расчётов, которые требуется учитывать в практических приложениях. В работе (Huang et al., 2021) рассматриваются три таких аспекта: «насыщение» индекса при значительной плотности растительности, различия в характеристиках спутниковых сенсоров и влияние атмосферы. Эффект насыщения индекса — это «его нечувствительность к изменению биомассы, когда биомасса достигает определённого высокого уровня». При таких условиях даже небольшие погрешности расчёта индекса будут иметь существенное значение. Проблеме корректного расчёта NDVI для конкретных спутников уделяется повышенное внимание (Albarakat, Lakshmi, 2019; Lee et al., 2020). В последней работе анализируются рассогласования наиболее популярных спутниковых сенсоров: Landsat, MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и AVHRR (*англ.* Advanced Very-High-Resolution

Radiometer). Спутниковые данные проходили тщательную обработку. Они хорошо откалиброваны. Проведены коррекции на влияние атмосферных газов, рэлеевского рассеяния, аэрозольного рассеяния и влияния полупрозрачной облачности (перистые облака). Тем не менее наблюдаются систематические рассогласования. Так, NDVI по данным радиометра MODIS систематически выше, чем по данным Landsat и AVHRR, на 0,02. При этом осреднённые данные в течение 17 лет испытывают регулярные колебания друг относительно друга в пределах величины 0,05.

Приведённые в разобранных публикациях причины искажения индекса NDVI не единственные. Так, в работе (Uudus et al., 2013) описывается дневная изменчивость индекса с максимальным значением в 12:30 местного времени и с уменьшением NDVI на величину 0,04–0,06 к 16:30. И хотя в исследовании делается предположение об особенностях дневной изменчивости фотосинтеза, есть ряд других физических параметров, которые могут это также объяснять (рост площади теней, отличие функции отражательной способности поверхности от рассеяния по закону Ламберта). К сожалению, небольшое количество наземных наблюдений и неоднородность видового состава растительности не позволяют сделать однозначные выводы. Для более детального анализа источника ошибок при расчёте индекса NDVI необходимы массовые сравнения спутниковых величин с подспутниковыми полигонными измерениями.

Есть два варианта расчёта индекса NDVI. В первом варианте (продукт NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства — НАСА) MOD13 (Huete et al., 1999)) индекс оценивается за 16-дневный временной интервал и основан на обработке данных, прошедших атмосферную коррекцию (продукт MOD09). При расчёте продукта MOD09 проводится атмосферная коррекция изображений. При этом погрешности могут быть значительными (Shenglei et al., 2014). Поэтому даже в инструкции по обработке данных радиометров MODIS отмечается, что алгоритм расчёта продукта MOD09 не обеспечивает окончательную атмосферную коррекцию (Gumley et al., 2007). Второй вариант расчёта NDVI реализован в пакете программ SeaDAS. Он не использует атмосферную коррекцию на аэрозоль и рассчитывается для каждого сеанса съёмки. В средних широтах и при континентальном климате влияние аэрозоля может оказаться незначительным, что делает этот алгоритм более предпочтительным, но требующим проверки. В данном исследовании мы использовали второй вариант расчёта NDVI.

Развитие Государственной корпорацией по космической деятельности «Роскосмос» информационных сервисов для обеспечения потребителей данными тематической обработки спутниковой информации с российских космических аппаратов (КА) в рамках проекта «Цифровая Земля» (Хайлов, Заичко, 2020), а также создание банка базовых продуктов (Селин и др., 2019) предполагает высокое качество обработки информации. Несмотря на то что вегетационный индекс входит в базовые продукты, подробного описания его расчёта по данным с таких широко используемых КА, как «Канопус-В», на сайте Научного центра оперативного мониторинга Земли официально не приводится. В работе (Васильев и др., 2018) показано хорошее соответствие индексов NDVI, рассчитанных по данным спутников «Канопус-В», индексам спутников Landsat. Однако функции спектральной чувствительности каналов у них существенно разные, поэтому значения NDVI будут различаться уже по этой причине. Соответственно, поправки на учёт влияния атмосферных газов, рэлеевского рассеяния, аэрозольного рассеяния и рассеяния полупрозрачной облачностью также будут разными. Кроме того, вызывает сомнение, что данные спутников Landsat можно рассматривать как эталон. В работе (Czapla-Myers et al., 2015) приводятся результаты абсолютной калибровки прибора OLI/Landsat-8 (*англ.* Operational Land Imager) на различных полигонах. Наблюдаются значительные систематические ошибки регистрируемой спутником спектральной яркости: от –3 до 6 %. И это средний показатель по полигонам. Для некоторых каналов ошибка существенно зависит от полигона и достигает ещё большей величины. При точной калибровке систематическая ошибка должна быть небольшой и не зависеть от полигона. В связи с этим возникает несколько вопросов. С какой точностью возможно рассчитать индекс NDVI по спутниковым данным и каково влияние условий наблюдений на точность для хорошо откалиброванного

радиометра? Какие спектральные характеристики спутникового радиометра следует считать эталоном? Рассмотрению этих вопросов на примере оценки точности расчёта индекса NDVI по данным радиометра MODIS/Aqua и *in situ* измерениям, а также по модельным расчётам индекса для радиометров MODIS/Aqua, Landsat-8/OLI-1, Landsat-9/OLI-2 и «Канопус-В»/МСС посвящена настоящая работа.

Данные и методики их обработки

Вегетационный индекс NDVI рассчитывается по формуле (Rouse et al., 1973):

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}}}, \quad (1)$$

где ρ_{RED} и ρ_{NIR} — коэффициенты спектральной яркости в красной и ближней инфракрасной областях спектра соответственно. Вегетационные индексы вводились для задачи оценки площади листы (Jordan, 1969), в расчётах были использованы спектральные каналы 0,675 мкм (RED — красный) и 0,800 мкм (NIR — *англ.* near infrared, ближний инфракрасный).

В настоящей работе использовались изображения соответствующих спектральных каналов спектрометрического радиометра MODIS спутника Aqua (пространственное разрешение 250 м). Данные MODIS уровня 0 были получены из Центра космических полётов имени Годдарда НАСА (*англ.* Goddard Space Flight Center) и обработаны пакетом программ SeaDAS (OCSSW 7.5).

Спутниковые данные проходили предварительную отбраковку. Фильтровались пиксели, покрытые облачностью. Для фильтрации подпиксельной облачности в окрестности точки измерения 3×3 (750×750 м при съёмке в надири) считались средние величины NDVI и стандартные отклонения σ . Отбраковывалось 5 % измерений, которым соответствовали спутниковые данные, имеющие максимальные стандартные отклонения в окрестности измерения. Остались точки со значениями средних, лежащих в диапазоне 0,14–0,57, и имеющие стандартные отклонения не более 0,037 (среднее значение σ равнялось величине 0,013).

Подспутниковые измерения получены наземной станцией радиометрической калибровки на базе полигона Ла-Кро (Франция, *фр.* La Crau) (Radiometric Calibration Network Portal, <https://www.radcalnet.org/#!/>). Полигон находится вблизи побережья Средиземного моря, в 50 км к северо-западу от Марселя, и представляет собой степной регион площадью около 60 км^2 (RadCalNet..., 2018). Изначально полигон создавался для калибровки камер спутников SPOT (*фр.* Satellite Pour l'Observation de la Terre) и расчёта вегетационных характеристик. Поверхность полигона плоская и покрыта травой. Среднемесячная температура положительная. Летом осадков выпадает мало, и трава может засыхать. Станция радиометрической калибровки представляет собой автоматическую фотометрическую станцию ROSAS (*англ.* RObotic Station for Atmosphere and Surface characterization) (Meygret et al., 2011) на столбе высотой 10 м и измеряемую площадку диаметром 33 м (*рис. 1*, см. с. 136). Для измерений используются радиометр фирмы Cimel и спектрометрический радиометр ASD FieldSpec 4. Радиометр измеряет в диапазоне 380–1600 нм в десяти узких спектральных каналах шириной 9 нм. Спектрометрический радиометр измеряет непрерывный спектр. Приборы вращаются на столбе и измеряют излучение солнца, излучение неба в двух плоскостях и излучение поверхности полигона по схеме (см. *рис. 1*) для 12 зенитных углов в диапазоне от 0 до 60° . Полный цикл измерений проводится за 90 мин. Программное обеспечение по обработке данных аппроксимирует данные по пространству и спектру, рассчитывает оптические характеристики атмосферы, вычисляет двухлучевую функцию отражательной способности поверхности (brdf-функцию), рассчитывает яркость поверхности и излучение, которое измерял бы спутник при съёмке в надири.

По данным измерений станции за семь лет её существования в период с 2015 по 2021 г. были автоматически отобраны безоблачные в месте расположения станции изображения радиометра MODIS/Aqua и получены параметры спутниковых и подспутниковых наблюдений. Данные совпадали по положению и времени измерений. Были рассчитаны вегетационные

индексы по данным радиометра MODIS/Aqua ($NDVI_M$) и по данным станции ($NDVI_S$). При расчёте $NDVI_S$ использовались измерения спектральных каналов, ближайших к центральному волновым числам спутникового радиометра (RED — 0,645 мкм и NIR — 0,859 мкм). Спектральные характеристики данных станции даются с шагом 10 нм. Было получено более 850 измерений. Поскольку функции спектральной чувствительности (ФСЧ) как спутниковых, так и наземных измерителей узкие, то влияние на результат особенностей ФСЧ не учитывалось.

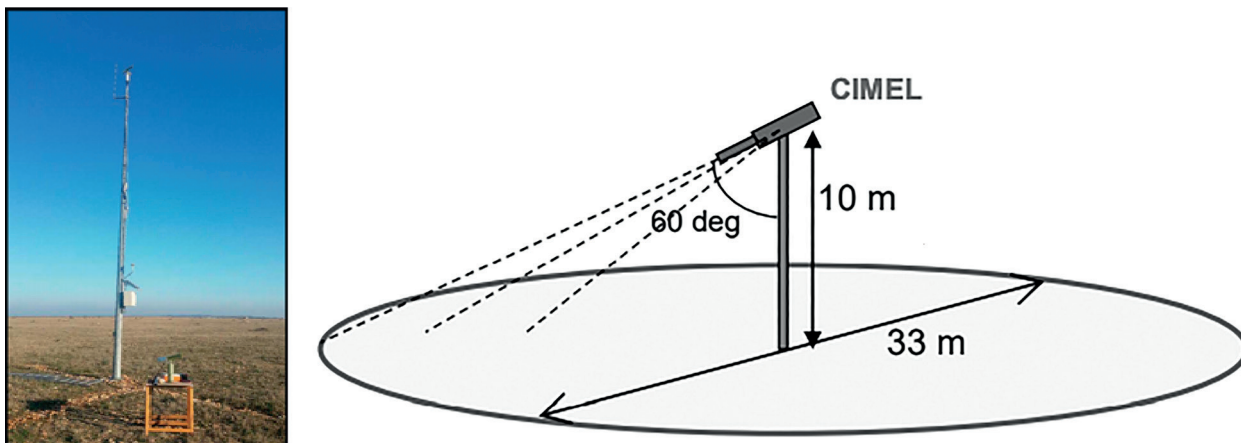


Рис. 1. Станция радиометрической калибровки La Crau (слева) и схема её работы (справа)

При анализе данных оценивались систематические погрешности (средние отклонения сравниваемых величин со знаком), стандартные отклонения и точность расчёта коэффициентов линейных регрессий с уровнем достоверности 95 %. Строились линейные зависимости погрешностей расчёта от тех параметров зондируемой среды и геометрии сканирования, которые могут влиять на точность расчётов. Учёт влияния таких параметров уже заложен в моделях расчёта восходящего от поверхности излучения. Здесь мы проверяем корректность работы таких моделей. Вывод о корректности работы моделей делается на основе сравнения величины поправки, которую может обеспечить применение линейной регрессии, с величинами систематической и случайной погрешностей, оценёнными по всему набору сравниваемых данных. При анализе зависимостей погрешностей расчёта $NDVI_M$ от параметров использовалась регрессия:

$$\varepsilon = NDVI_M - NDVI_S = aP + b, \quad (2)$$

где P — параметр, от которого может зависеть точность; a и b — коэффициенты регрессии. В некоторых случаях коэффициент b не использовался.

Результаты

Сравнение вегетационных индексов

Результаты сравнения спутниковых и подспутниковых измерений приведены на рис. 2. Систематическое рассогласование вегетационного индекса $NDVI_M$, построенного по данным радиометра MODIS, небольшое и равно $-0,005$. То есть индекс несколько меньше, чем индекс $NDVI_S$, измеренный на станции. Точность расчёта систематического рассогласования — $0,001$. Стандартное отклонение составляет величину $\sigma = 0,03$. Если оценивать наклон графика по формуле $NDVI_M = a \cdot NDVI_S$, то величина $a = 0,977 \pm 0,003$ при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,91$. Здесь и далее для параметров регрессии указывается их точность расчёта с уровнем достоверности 95 %.

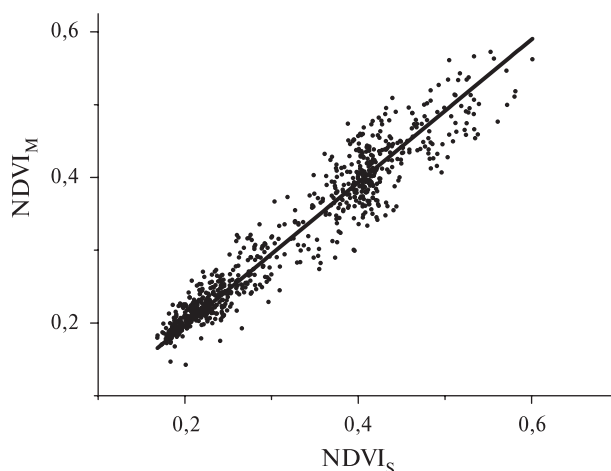


Рис. 2. Сопоставление вегетационных индексов $NDVI_M$ и $NDVI_S$

Влияние влагосодержания атмосферы на точность расчёта нормализованного вегетационного индекса

Используемый алгоритм расчёта $NDVI_M$ не учитывает влияние аэрозоля, что может исказить коэффициенты спектральной яркости. Возникающая из-за него погрешность носит в основном мультипликативный характер, так как проходящее через атмосферу солнечное излучение ослабляется пропорционально аэрозольной оптической толщине. Близкие спектральные каналы будут иметь и близкие атмосферные толщины. Поскольку формула (1) даёт нам нормализованный индекс, то возникающая погрешность будет зависеть от разницы оптических толщин двух близких спектральных каналов. Можно ожидать, что она будет небольшой. Данные станции La Crau содержат параметр общего влагосодержания — массы водяного пара и капельной влаги. В данном случае проводилась оценка зависимости погрешности от этого параметра.

Общее влагосодержание атмосферы за период наблюдений колебалась в диапазоне от 0 до 8 г/см^2 . Чётко выраженной зависимости не наблюдалось (рис. 3). Линейная регрессия (2) давала слабый тренд в сторону увеличения погрешности при росте влагосодержания атмосферы. Данным соответствует линейная регрессия с очень маленьким коэффициентом детерминации $R^2 = 0,005$ и следующими параметрами: $a = 0,001 \pm 0,0007$, $b = -0,006 \pm 0,02$. Нулевые значения регрессии лежат в области 3 г/см^2 . Максимальные отклонения от средней погрешности достигались на краях диапазона влажности и не превышали стандартное отклонение $\sigma = 0,03$.

В то же время модельные расчёты показывают (Holben, 1986; Xie et al., 2010), что отсутствие коррекции изображений на аэрозоль может приводить к занижениям $NDVI$, достигающим величин $0,1-0,2$. Это максимальные возможные погрешности. На рис. 3 фактически наблюдается отсутствие зависимости погрешности от влагосодержания атмосферы для данного полигона. Зависимость погрешности расчёта $NDVI$ от аэрозольной оптической толщины имела примерно те же закономерности.

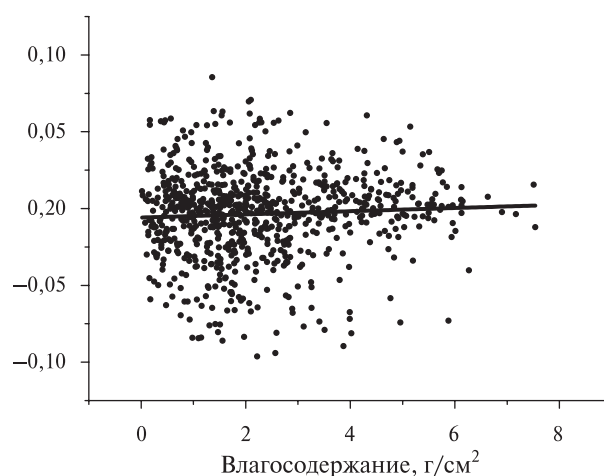


Рис. 3. Зависимость ошибки расчёта вегетационного индекса $NDVI_M$ от общего влагосодержания атмосферы

То есть погрешности, обусловленные отсутствием учёта влагосодержания атмосферы, лежат в пределах общей погрешности расчётов. Но нужно отметить, что лето в данном регионе настолько засушливое, что трава высыхает. Поэтому высокие значения влагосодержания на данном полигоне отсутствуют.

Влияние азимутальных углов

Оценивающие физические параметры поверхности спутниковые алгоритмы предполагают, что отражённое от растительности излучение является диффузным. Отсутствует учёт зеркальных отражений. Интенсивность зеркальных отражений зависит от разницы азимутальных углов ($\Delta\psi$) двух направлений: спутник – зондируемая площадка и солнце – зондируемая площадка. Чем больше разность $\Delta\psi$, тем вероятней наличие зеркальных отражений. Максимальные величины зеркальных отражений будут при $\Delta\psi = 180^\circ$. Это подтверждается brdf-функциями, строящимися на станции. Функции довольно однородные, за исключением направлений, близких к солнечному зайчику (Meugret et al., 2011). Оценивалась изменчивость погрешности расчёта $NDVI_M$ от $\Delta\psi$. Величины $\Delta\psi$ лежали в двух диапазонах: 20–60 и 100–140°. Последний диапазон соответствует летним месяцам при прохождении спутниковых трасс к западу от станции. Для первого диапазона средняя величина погрешности $NDVI_M$ была $-0,014 \pm 0,0015$, а для второго — $+0,0019 \pm 0,0016$. Для второго диапазона углов при определённых углах солнца над горизонтом и углах сканирования спутника солнечный зайчик оказывает влияние на величину отражённого излучения. Этим объясняется превышение среднего значения $NDVI_S$ для второго диапазона.

Влияния зенитного угла солнца

Зенитный угол солнца колебался от 20 до 70°. Коэффициенты линейной регрессии (2) составляют: $a = -0,0005 \pm 0,0002$, $b = 0,02 \pm 0,003$ — при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,08$. Нулевое значение регрессии приходится на угол $\sim 40^\circ$. Систематическая погрешность при росте зенитного угла от 20 до 70° изменяется от величины 0,01 до $-0,015$. Это не превышает стандартное отклонение $\sigma = 0,03$, полученное при расчёте $NDVI_M$.

Влияние несоответствия спектральных каналов различных спутников

Вегетационный индекс, вводившийся для оценки площади листьев деревьев, рассчитывался по измерениям спектрорадиометра в узких спектральных каналах с центральными волновыми числами 0,675 и 0,800 мкм. Центральное волновое число — средневзвешенная длина волны, где в качестве весов выступает функция спектральной чувствительности канала. Спутниковые измерения получены в спектральных каналах, различающиеся как шириной, так и центральными волновыми числами. Строгое сопоставление данных, измеренных различными спутниками, предполагает учёт свойств зондируемой поверхности, параметров съёмки и влияния атмосферы. Детально эта технология приведена, например, в работе (Chander et al., 2009). Она требует большого объёма синхронных спутниковых и подспутниковых измерений, которые сложно получить. Здесь сделаем только математические расчёты. В данном случае будем сравнивать только влияние различий центральных волновых чисел спутниковых каналов на результат расчёта $NDVI$. Для оценки изменчивости индекса $NDVI$, обусловленной различиями центральных волновых чисел каналов, были проведены расчёты на данных использовавшихся наземных измерений. При расчёте $NDVI_S$ для заданного спутника использовались измерения на станции, которые лучше всего соответствовали его спектральным каналам. На *рис. 4* (см. с. 139) приведены величины $NDVI_S$, соответствующие радиометрам спутников Aqua, Landsat-8, Landsat-9 и «Канопус-В». На *рис. 5* (см. с. 139) показаны функции спектральной чувствительности (I) используемых каналов. Можно отметить,

что величины NDVI различаются, и иногда существенно. В *таблице* приведены параметры этих различий. Приводятся средние рассогласования NDVI относительно эталонного, соответствующего центральным волновым числами RED 0,675 мкм и NIR 0,800 мкм. Это систематические расхождения, и они значительны (сопоставимы или превышают точность расчёта NDVI по спутниковым данным). Была оценена изменчивость NDVI на имеющейся базе данных. Для этого рассчитывались стандартные отклонения величин $NDVI_S$ для каждого спутника относительно среднего. Изменчивость зависит от центральных волновых чисел каналов. Эталонные спектральные каналы обеспечивают наибольший диапазон изменчивости NDVI, и им больше всего соответствуют данные спутников «Канопус-В».

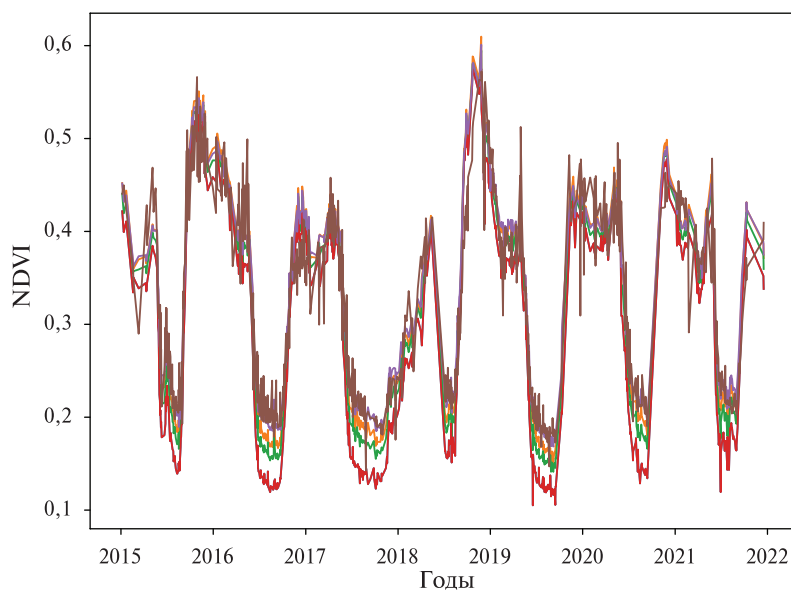


Рис. 4. Изменчивость модельных индексов $NDVI_S$ радиометров MODIS/Aqua (фиолетовый цвет), Landsat-8/OLI-1 (оранжевый), Landsat-9/OLI-2 (зелёный), «Канопус-В»/MCC (красный), а также данные спутниковых измерений $NDVI_M$ (коричневый)

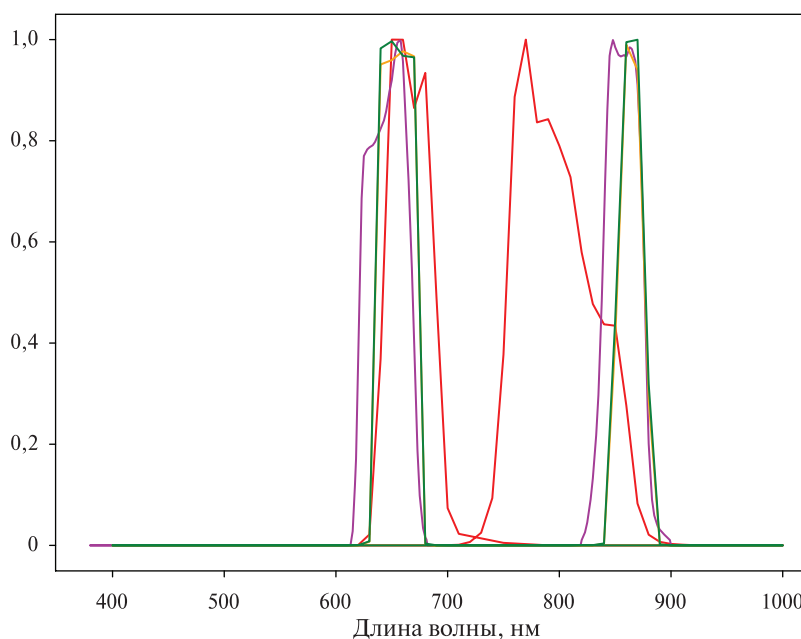


Рис. 5. Функции спектральной чувствительности используемых для расчёта NDVI каналов радиометров MODIS/Aqua (фиолетовый цвет), Landsat-8/OLI-1 (оранжевый), Landsat-9/OLI-2 (зелёный), «Канопус-В»/MCC (красный)

Различия величин вегетационных индексов,
обусловленные несоответствием спектральных каналов

Радиометры и их центральные волновые числа	Рассогласование	Изменчивость NDVI
MODIS/Aqua, RED 0,645 мкм, NIR 0,860 мкм	0,043±0,00067	0,107
Landsat-8/OLI-1, RED 0,660 мкм, NIR 0,870 мкм	0,036±0,0004	0,115
Landsat-9/OLI-2, RED 0,660 мкм, NIR 0,840 мкм	0,024±0,0003	0,117
«Канопус-В»/МСС, RED 0,675 мкм, NIR 0,800 мкм	0	0,124

Заключение

Нормализованный вегетационный индекс NDVI, определяемый по данным спутникового дистанционного зондирования Земли, играет важную роль в различных хозяйственных приложениях. Точность расчёта индекса существенно влияет на принимаемые решения. В данной работе рассмотрены вопросы влияния на точность параметров съёмки и характеристик спутниковых радиометров. Сравнивались значения индекса, рассчитанного алгоритмом пакета программ SeaDAS по данным радиометра MODIS/Aqua, со значениями, полученными на полигоне La Crau (Франция) за семь лет. Расчёты показали близость спутниковых и полигонных измерений: систематическое рассогласование — 0,005; стандартное отклонение $\sigma = 0,03$.

Систематическая ошибка небольшая. Поскольку размер пикселя радиометра существенно превышает размер площадки, на которой проводились *in situ* измерения, то утверждать, что систематические отклонения наличествуют, нельзя. Величина стандартного отклонения зависит от различных параметров. Влияние некоторых из них было оценено. В первую очередь проверялось влияние влагосодержания атмосферы и аэрозольной оптической толщины. При расчёте NDVI аэрозоль не учитывается, а имеющиеся в литературе модельные результаты говорят о возможности значительных погрешностей. Для данной станции влияние водяного пара и капельной влаги оказалось меньше стандартного отклонения σ . Но следует учесть, что лето на станции засушливое и случаев с высоким влагосодержанием нет. Влияние азимутальных углов съёмки и солнца, а также зенитного угла солнца оказалось также несущественным. Значительным оказалось влияние центральных волновых чисел каналов, используемых при расчёте NDVI. Модельные расчёты проводилось для следующих радиометров: MODIS/Aqua, Landsat-8/OLI-1, Landsat-9/OLI-2, «Канопус-В»/МСС. Систематические рассогласования были близки или превышали величину стандартного отклонения. Индексы обычно вводятся для оценки конкретных параметров состояния растительности. Подбираются наилучшие спектральные каналы для решения задачи. Вегетационные индексы вводились для задачи оценки площади листвы (Jordan, 1969). В расчётах использовались спектральные каналы 0,675 мкм (RED) и 0,800 мкм (NIR). В частности, для решения данной задачи наилучшими спектральными характеристиками обладают спутники «Канопус-В».

Работа поддержана программой «Приоритеты 2030» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Литература

1. Васильев А. И., Стремов А. С., Коваленко В. П., Михеев А. А. Методика сопоставления базовых продуктов МСС КА «Канопус-В» и Landsat ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 36–48. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-36-48.
2. Селин В. А., Марков А. Н., Васильев А. И., Коршунов А. П. Геоинформационный сервис «Банк базовых продуктов» // Ракетно-косм. приборостроение и информац. системы. 2019. Т. 6. Вып. 1. С. 40–48. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2019.6.1.40.48.

3. Хайлов М. Н., Заичко В. А. Научно-технические проблемы сбора, хранения, обработки, распространения и применения космической геопространственной информации в интересах российских потребителей // Дистанционное зондирование Земли из космоса в России. 2020. № 1. С. 6–15. http://2020.raystudio.ru/media/pdf/dzz/dzz-2020-01_n.pdf (дата обращения 19.08.2022).
4. Albarakat R., Lakshmi V. Comparison of normalized difference vegetation index derived from Landsat, MODIS, and AVHRR for the Mesopotamian Marshes between 2002 and 2018 // Remote Sensing. 2019. V. 11. Art. No. 1245. 16 p. DOI: 10.3390/rs11101245.
5. Chandler G., Markham B. L., Helder D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // Remote Sensing of Environment. 2009. V. 113. P. 893–903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>.
6. Czaplá-Myers J., McCorkel J., Anderson N., Thome K., Biggar S., Helder D., Aaron D., Leigh L., Mishra N. The ground-based absolute radiometric calibration of Landsat 8 OLI // Remote Sensing. 2015. V. 7. P. 600–626. <https://doi.org/10.3390/rs70100600>.
7. Gumley L., Desclotres J., Schmaltz J. Creating reprojected true color MODIS images: A tutorial. Version 1.0.1. 2007. 19 p. https://ftp.ssec.wisc.edu/pub/willemm/Creating_Reprojected_True_Color_MODIS_Images_A_Tutorial_process.pdf (accessed 31.07.2022).
8. Holben B. N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data // Intern. J. Remote Sensing. 1986. V. 7. No. 2. P. 1417–1434. DOI: 10.1080/01431168608948945.
9. Huang Sh., Tang L., Hupy J. P., Wang Ya., Shao G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing // J. Forestry Research. 2021. V. 32. No. 1. P. 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>.
10. Huete A., Justice Ch., van Leeuwen W. MODIS vegetation index (mod 13). Algorithm theoretical basis document. Version 3 / University of Arizona; University of Virginia. 1999. 129 p. https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf.
11. Jordan C. F. Derivation of leaf-area index from quality of radiation on the forest floor // Ecology. 1969. V. 50. No. 4. P. 663–666. <https://doi.org/10.2307/1936256>.
12. Lee K., Kim K., Lee S.-G., Kim Yo. Determination of the normalized difference vegetation index (NDVI) with top-of-canopy (TOC) reflectance from a KOMPSAT-3A image using orfeo toolBox (OTB) extension // ISPRS Intern. J. Geo-Information. 2020. V. 9. ID 257. 16 p. <https://doi.org/10.3390/ijgi9040257>.
13. Meygret A., Santer R., Berthelot B. ROSAS a Robotic station for atmosphere and surface characterization dedicated to on-orbit calibration // Proc. SPIE. 2011. V. 8153. ID. 815311. DOI: 10.1117/12.892759.
14. RadCalNet guidance site characterisation. CEOS reference: QA4EO-WGCV-RadCalNet-G2_v1. Version: 1.0. 2018. https://www.radcalnet.org/documentation/RadCalNetGenDoc/G2-RadCalNetGuidance-SiteCharacterisation_V1.pdf.
15. Rouse J. W., Haas R. Y., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS // 3rd ERTS Symp. NASA, Goddard Space Flight Center, 1973. V. 1. Sect. A. Paper-A20. P. 309–317. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614> (accessed 31.07.2022).
16. Uudus B., Park K.-A., Kim K.-R., Kim J., Ryu J.-H. Diurnal variation of NDVI from an unprecedented high-resolution geostationary ocean colour satellite // Remote Sensing Letters. 2013. V. 4. No. 7. P. 639–647. DOI: 10.1080/2150704X.2013.781285.
17. Wang Sh., Yang M., Li J., Shen Q., Zhang F. MODIS surface reflectance product (MOD09) validation for typical inland waters in China // Ocean Remote Sensing and Monitoring from Space // Proc. SPIE. 2014. V. 9261. ID 92610F. DOI: 10.1117/12.2068628.
18. Xie Y., Zhao X., Li L., Wang H. Calculating NDVI for Landsat7-ETM data after atmospheric correction using 6S model: A case study in Zhangye city, China // 18th Intern. Conf. Geoinformatics. 2010. P. 1–4. DOI: 10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567553.

Influence of observation conditions on the accuracy of NDVI vegetation index calculation from Earth remote sensing data

A. I. Aleksanin^{1,2}, A. N. Timofeev²

¹ *Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia*

² *Far East Federal University, Vladivostok 690922, Russia*

E-mail: aleks@iacp.dvo.ru

The problem of calculating the normalized vegetation index (NDVI) from satellite data is considered. The index values calculated from the MODIS/Aqua radiometer data by the SeaDAS software package algorithm are compared with the values obtained at the research site La Crau (France) for 7 years. The site is located near the Mediterranean coast and is a flat field where grass grows. The measurements are carried out by an automatic photometric station ROSAS. Calculations show the proximity of satellite and field measurements: bias — 0.005; standard deviation 0.03. The algorithm used does not take into account the effect of aerosol on the NDVI value. However, the errors due to the lack of accounting for aerosol lie within the limits of the total calculation error. There is a slight dependence of the error on the zenith angle of the sun, which varied in the range from 20 to 70°. The bidirectional reflectance distribution function of the surface on the site is uniform, except for the directions close to the sunbeam. The measurements were far from the sunbeam zone. However, the accuracy of the calculation depends on the difference between the azimuth angle of the site survey and the azimuth to the sun. The NDVI mismatches due to differences in the central wave numbers of different satellites also turned out to be significant. The comparison was made for the following radiometers: MODIS/Aqua, Landsat-8/OLI-1, Landsat-9/OLI-2, Kanopus-V/MSS.

Keywords: vegetation index NDVI, atmospheric image correction, MODIS/Aqua

Accepted: 29.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-133-143

References

1. Vasil'ev A. I., Stremov A. S., Kovalenko V. P., Mikheev A. A., Methodology of Kanopus-V MSS and Landsat ETM+ basic product comparison, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 36–48 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-36-48.
2. Selin V. A., Markov A. N., Vasil'ev A. I., Korshunov A. P., Geoinformation service “Bank of basic products”, *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2019, Vol. 6, No. 1, pp. 40–48 (in Russian), DOI: 10.30894/issn2409-0239.2019.6.1.40.48.
3. Khailov M. N., Zaichko V. A., Scientific and technical problems of collection, storage, processing, distribution and application of space geospatial information in the interests of Russian consumers, *Distantsionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa v Rossii*, 2020, No. 1, pp. 6–15 (in Russian), http://2020.raystudio.ru/media/pdf/dzz/dzz-2020-01_n.pdf (accessed 19.08.2022).
4. Albarakat R., Lakshmi V., Comparison of normalized difference vegetation index derived from Landsat, MODIS, and AVHRR for the Mesopotamian Marshes between 2002 and 2018, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, ID 1245, 16 p., DOI: 10.3390/rs11101245.
5. Chander G., Markham B. L., Helder D. L., Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors, *Remote Sensing of Environment*, 2009, Vol. 113, pp. 893–903, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>.
6. Czapla-Myers J., McCorkel J., Anderson N., Thome K., Biggar S., Helder D., Aaron D., Leigh L., Mishra N., The ground-based absolute radiometric calibration of Landsat 8 OLI, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, pp. 600–626, <https://doi.org/10.3390/rs70100600>.
7. Gumley L., Descloitres J., Schmaltz J., *Creating reprojected true color MODIS images: A tutorial*, Version 1.0.1, 2007, 19 p., https://ftp.ssec.wisc.edu/pub/willemm/Creating_Reprojected_True_Color_MODIS_Images_A_Tutorial_process.pdf (accessed 31.07.2022).
8. Holben B. N., Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data, *Intern. J. Remote Sensing*, 1986, Vol. 7, No. 2, pp. 1417–1434, DOI: 10.1080/01431168608948945.
9. Huang Sh., Tang L., Hupy J. P., Wang Ya., Shao G., A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing, *J. Forestry Research*, 2021, Vol. 32, No. 1, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>.

10. Huete A., Justice Ch., Leeuwen W., *MODIS vegetation index (mod 13), Algorithm theoretical basis document*, University of Arizona, University of Virginia, 1999, 129 p., https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf.
11. Jordan C. F., Derivation of leaf-area index from quality of radiation on the forest floor, *Ecology*, 1969, Vol. 50, No. 4, pp. 663–666, <https://doi.org/10.2307/1936256>.
12. Lee K., Kim K., Lee S.-G, Kim Yo., Determination of the normalized difference vegetation index (NDVI) with top-of-canopy (TOC) reflectance from a KOMPSAT-3A image using orfeo toolBox (OTB) extension, *ISPRS Intern. J. Geo-Information*, 2020, Vol. 9, ID 257, 16 p., <https://doi.org/10.3390/ijgi9040257>.
13. Meygret A., Santer R., Berthelot B., ROSAS a Robotic station for atmosphere and surface characterization dedicated to on-orbit calibration, *Proc. SPIE*, 2011, Vol. 8153, ID. 815311, DOI: 10.1117/12.892759.
14. *RadCalNet guidance site characterisation. CEOS reference: QA4EO-WGCV-RadCalNet-G2_v1. Version 1.0*, 2018, https://www.radcalnet.org/documentation/RadCalNetGenDoc/G2-RadCalNetGuidance-SiteCharacterisation_V1.pdf.
15. Rouse J. W., Haas R. Y., Schell J. A., Deering D. W., Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, *3rd ERTS Symp.*, NASA, Goddard Space Flight Center, 1973, Vol. 1, Sect. A, Paper-A20, pp. 309–317, <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614> (accessed 31.07.2022).
16. Uudus B., Park K.-A., Kim K.-R., Kim J., Ryu J.-H., Diurnal variation of NDVI from an unprecedented high-resolution geostationary ocean colour satellite, *Remote Sensing Letters*, 2013, Vol. 4, No. 7, pp. 639–647, DOI: 10.1080/2150704X.2013.781285.
17. Wang Sh., Yang M., Li J., Shen Q., Zhang F., MODIS surface reflectance product (MOD09) validation for typical inland waters in China, *Ocean Remote Sensing and Monitoring from Space: Proc. SPIE*, 2014, Vol. 9261, ID 92610F, DOI: 10.1117/12.2068628.
18. Xie Y., Zhao X., Li L., Wang H., Calculating NDVI for Landsat7-ETM data after atmospheric correction using 6S model: A case study in Zhangye city, China, *18th Intern. Conf. Geoinformatics*, 2010, pp. 1–4, DOI: 10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567553.