ОПРЕДЕЛЯНЕ НА МЪТНОСТ НА ВОДАТА В ЯЗОВИР „ПЧЕЛИНА“ ПО ДАННИ ОТ САТЕЛИТНИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТ SENTINEL-2 И LANDSAT 9

Христо Николов, Мартина Димитрова

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: hristo@stil.bas.bg, martina.dimitrova@space.bas.bg

Ключови думи: *Дистанционни наблюдения на Земята, Sentinel-2, Landsat 9, NDTI, Acolite*

Резюме: *В настоящата работа е разгледана възможността за определяне на мътността на водата в язовир „Пчелина“ по данни от сателитите Sentinel-2 и Landsat 9. За постигане на поставената цел са използвани сателитни изображения ниво на обработка L1. Атмосферната корекция е направена със софтуер ACOLITE. Върху основа на атмосферно коригираните данни е изчислен нормализиран индекс за мътност NDTI. Сравнени са стойностите на NDTI в пикселите от изображенията на Sentinel-2 и Landsat 9. Изчислена е водната площ, върху която се прилага индексът.*

DETERMINATION OF WATER TURBIDITY IN PCHELINA RESERVOIR USING SENTINEL-2 AND LANDSAT 9 SATELLITE IMAGERY DATA

Hristo Nikolov, Martina Dimitrova

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: hristo@stil.bas.bg, martina.dimitrova@space.bas.bg,

Keywords: *remote sensing, Sentinel-2, Landsat 9, NDTI, Acolite*

Abstract: *The study is focused on the possibility of determining water turbidity in the Pchelina reservoir using data from Sentinel-2 and Landsat 9. In order to achieve the set objective satellite images processed to level 1 were used. The atmospheric correction was performed using ACOLITE software. The Normalized Difference Turbidity Index (NDTI) was applied to the atmospherically corrected data. NDTI values from Sentinel-2 and Landsat 9 pixels were compared. The water area of index application was calculated.*

Въведение

Обект на изследване

Язовир Пчелина е разположен на р. Струма на 619 m надм. в. Намира се в Югозападна България, Област Перник, община Ковачевци, най-близкото населено място е село Лобош. Около язовира са разположени землищата и на селата Ковачевци, Радибош и Пробой. Към 2026 г. водния обект е собственост на Министерство на земеделието и храните. [1] По проект обемът на язовира е 54.8 x 10^6 m^3. Мъртвият обем е 34 x 10^6 m^3, а полезният - 20.6 x 10^6 m^3. Максималната площ е 538 ha, а максималната дълбочина - 19 m. [2] Язовирът е въведен в експлоатация през 1974 г. Неговата основна функция е да послужи за утаяване на суспендираните вещества, които са постъпили в р. Струма от промишлените предприятия на Перник и Радомир. [2] От 2015 г. е пуснат в експлоатация МВЕЦ „Пчелина“. Водите на язовира се използват и за селскостопанско напояване.

Язовир „Пчелина“ е включен в Националната система за мониторинг на околната среда и попада в списъка на 52-та комплексни и значими язовира, управлявани и следени от Министерството на околната среда и водите. [3]

Най-често мътността на водата се определя от количеството разтворени органични и неорганични вещества в нея, както и наличието на живи организми като например фитопланктон. Според дефиницията на ASTM International, мътността е израз на оптичните

свойства на дадена течност, които водят до процеси на разсейване и поглъщане на попадналата електромагнитна енергия от оптичния диапазон, вместо да преминават през пробата по права линия.[4] Основна причина за повишаване на мътността са постъпващите седименти носени от речното течение, които вследствие процесите на отлагане се задържат в язовирната чаша. Следва да се отбележи, че освен седименти, постъпващата във водното тяло водна маса може да внесе и биогенни елементи (напр. азот, фосфор) в следствие на дифузно или точково замърсяване. Така се стига до ускоряване на еутрофизацията. В резултат възникват цъфтежи на фитопланктона и свързаните с тях неблагоприятни ефекти за всички останали групи водни организми – намалено количество светлина, проникваща в дълбочина, гниене и изчерпване на кислорода. Може да се стигне до измиране на рибите и другите водни организми от задушаване. [5]

Докладът на Съвместния изследователски център[1] [6] за прилагане на подход, прилагащ данни от дистанционни изследвания (ДИ) на Земята в подкрепа на Рамкова директива за водите (РДВ), разглежда актуалното състояние за приложението им при извършване на мониторинг и оценка на екологичното състояние на повърхностни води в Европа. Според проучването, данните от ДИ понастоящем не се използват в повечето държави-членки, въпреки че има добри резултати в подкрепа на използването им. Съществуват разработени приложения (във Финландия, Швеция, Белгия), които предоставят данни от ДИ, които се използват като за получаване на оперативна информация чрез правилото за „експертна оценка“ или чрез моделиране. Според проучването от доклада [6], в повечето държави-членки от ЕС има желание за използване от ДИ за РДВ. Ползите от използването на данните от ДИ са, че може да се постигне по-добро пространствено и времево покритие на мониторинга относно състоянието на обекта, като също така следва да се отбележи, че са по-изгодни от икономическа гледна точка.

Данни и метод

Настоящото изследване на яз. „Пчелина“, има за цел да допринесе за подобряване качеството на оперативния мониторинг на водни тела, използвайки на данни от ДИ на Земята. В рамките на този процес като основен източник на данни са използвани многоканални данни от сателитните спектрометрични апаратурни комплекси, работещи в оптичния диапазон на електромагнитния спектър, разположени на борда на Sentinel 2 и Landsat 9. Данните от двете сателитни мисии се предоставят под формата на безплатни изображения със свободен достъп, но при условие да бъдат цитиран техният произход.

Сателитни данни

За постигане целите на конкретното изследване бяха използвани два набора сателитни данни – от мисиите Sentinel 2 и Landsat 9. В този случай данните бяха и от една и съща дата – 17 април 2026 г., което доведе до повишаване на достоверността на резултатите, тъй като може да се допусне, че състоянието на атмосферата и на изследвания обект при двете регистрации е било сходно. Това дава основание резултатите от обработката на двата набора данни да се сравняват директно. Основание за това дава и фактът, че двете мисии преминават в рамките интервал от 1 час, което не променя съществено количеството енергия, попадащо върху изследвания обект, както и намалява появата на сенки върху него.

Sentinel-2 е сателитна мисия на Европейския съюз и е изведена в орбита в рамките на програма „Коперник“, която има за задача да предоставя многоканални данни от оптичния, близкия инфрачервен и късовълновия инфрачервен диапазони на електромагнитния спектър. В момента тя се състои от три сателита A, B и C, като всички се движат по една и съща слънчево-синхронна орбита (786 km). Фазовото отместване на основната двойка B и C е 180^{o}, а третият A е на 36^{o} от B. Това позволява да се постигне максимална времева разделителна способност от 5 дни за изследваните площи на екваториални ширини, докато за средни ширини да намалява до 2-3 дни. Всеки един сателитите е оборудван със сензор MSI (Multi Spectral Imager), който има 13 спектрални канала. Следва да се има предвид, че тяхната пространствената разделителна способност (ПРС) е различна 10, 20 и 60 m, което налага прилагане на процедура по тяхната пространствена трансформация за нуждите на конкретна задача, ако се използват канали от различна ПРС.

Данните от Sentinel-2 MSI обработени до ниво L1C бяха изтеглени от основното хранилище за данни по програма „Коперник“ (https://browser.dataspace.copernicus.eu/). Продуктът L1C се състои от единични сцени с площ 100 km², предоставяни в проекция UTM/WGS84. Радиометричните измервания за всеки пиксел са представени като стойности на отражателната способност на подстилащата повърхност на „горна граница на атмосферата“ (TOA). [7] Конкретно за това изследване изображенията от Sentinel-2 са от 17 април 2026 г.

[1] Joint Research Center

Сателитът Landsat 9 (L9) е мисия на Геоложката служба на САЩ изведен в слънчево-синхронна орбита (705 km) на 21 септември 2021 г. Той разполага с два сензора – OLI-2 (Operational Land Imager) 9 канала в оптичния диапазон и TIRS-2 (Thermal Infrared Sensor) два канала в термалния диапазон, които са почти идентични с тези на предшестващия го Landsat 8. В оптичния диапазон пространствената разделителна способност на каналите е 30 m, като изключение преви панхроматичния канал, при който тя е 15 m. Предимството на OLI-2 е подобрената радиометрична разделителна способност за сензора– 14 битова/пиксел спрямо 12 битова/пиксел при OLI. Това позволява да се регистрират по-малки разлики в отражателната способност на обектите за конкретен спектрален канал, особено при обекти, които в изображенията са по-тъмни като например водни басейни или тропически гори. Времевата разделителна способност (периода на повторно преминаване) на L9 е 16 дни, а при съвместно използване с L8 се свежда до 8 дни. [8, 9] Данните от L9 са получени от платформата Earth Explorer на Геоложката служба на САЩ (USGS) за 17 април 2026 г., ниво на обработка L1. [10]

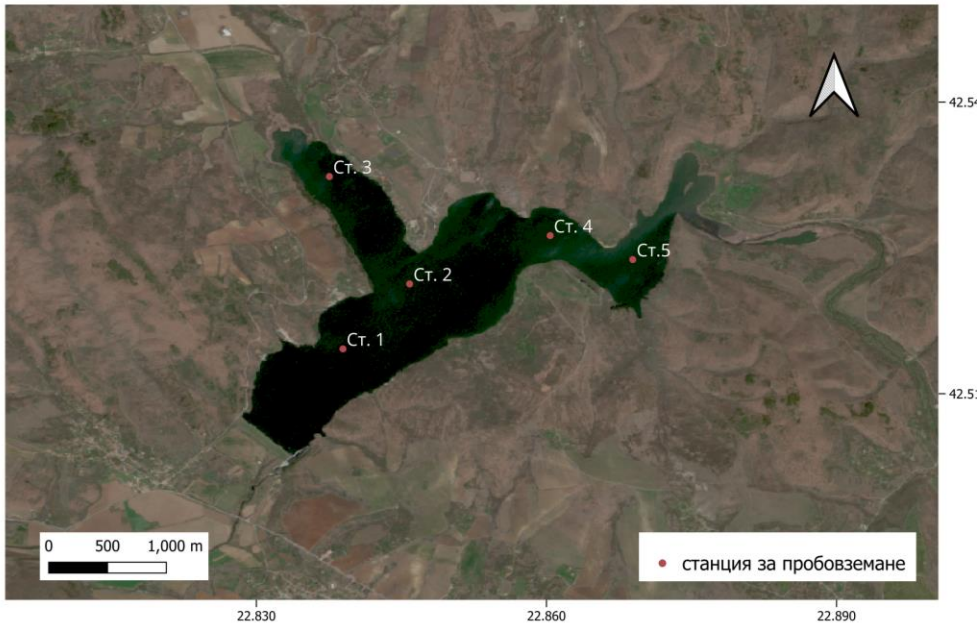
Атмосферна корекция

Използваните за получаване на крайните резултати изображения са във формат от ниво С1 без приложена атмосферна корекция. Причината да се започне оттам е, че продуктите от ниво L2 прилагани от доставчиците на данни стандартно прилагат подходи ориентирани към обекти от сушата и не отразяват спецификите на водни обекти. Поради тази те бяха обработени до ниво L2 със софтуерния продукт ACOLITE, който позволява избор на алгоритми за атмосферна корекция. Той е разработен от Кралския белгийски институт за природни науки (RBINS) и е ориентиран към анализ на водни обекти въз основа на сателитни данни от сателити като Landsat (5/7/8/9), Sentinel-2 (A/B/C), Pléiades и PlanetScope. ACOLITE е особено подходящ за обработка на данни за мътни води и малки вътрешноконтинентални водни басейни, но може да се използва и за по-бистри води, както и за земната повърхност. Последната версия на продукта предоставя възможност за обработка на данни от сензори с висока ПРС от порядъка на метър и по-висока (като напр. Pléiades, WorldView и PlanetScope). [11]

В рамките на проведеното изследване бяха подбрани и обработвани изображения от една и съща дата – 17.04.2026 г. Пролетния период от годината предоставя благоприятни условия за регистрация на многоканални данни, тъй като през него се очаква да има по-малко облачна покривка в сравнение със зимния период. И двата използвани набори данни са под формата на изображения обработени от производителя до ниво С1 – без атмосферна корекция. Първа стъпка в проведената обработка беше да се приложи атмосферна корекция посредством програмния продукт ACOLITE, който предоставя по-надеждни резултати за стоящи водни обекти. Следващия етап от обработката е проведен в ГИС среда. От атмосферно коригираните изображения е изчислен диференциалният нормализиран индекс за мътност на водата. На фигура 1 върху растерна подложка създадена от RGB каналите на Sentinel-2 е показан формираният векторен точков слой, който съответства на примерни станции за пробовземане, съобразени с особеностите на конкретното водно тяло и осигуряващи статистически представителни резултати относно състоянието на пропускливостта на цялата площ на обекта.

От получените атмосферно коригирани изображения по формула (1), в която R е коефициентът на спектрално отражение в съответния спектрален диапазон на MSI или OLI-2, е изчислен нормализираният разликов индекс за мътност на водата NDTI (Normalized Difference Turbidity Index). Той използва нормализираната разлика на червения и зеления канали на сензора. Този индекс се базира на факта, че коефициентът на отражение на бистрата вода е по-висок в зелената област на спектъра, отколкото в червената. По-високата степен на мътност води до по-висока стойност на NDTI и обратно. Стойностите на индекса NDTI могат да са в диапазона от -1 до 1. [12]

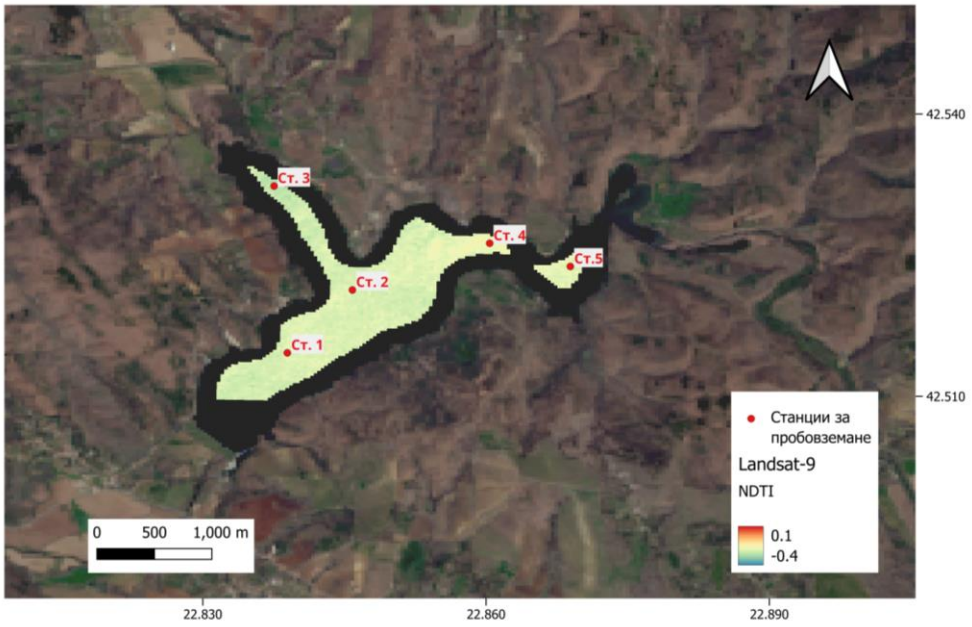
(1) $$\mathrm{NDTI} = \frac{R_{\mathrm{red}} - R_{\mathrm{green}}}{R_{\mathrm{red}} + R_{\mathrm{green}}}$$



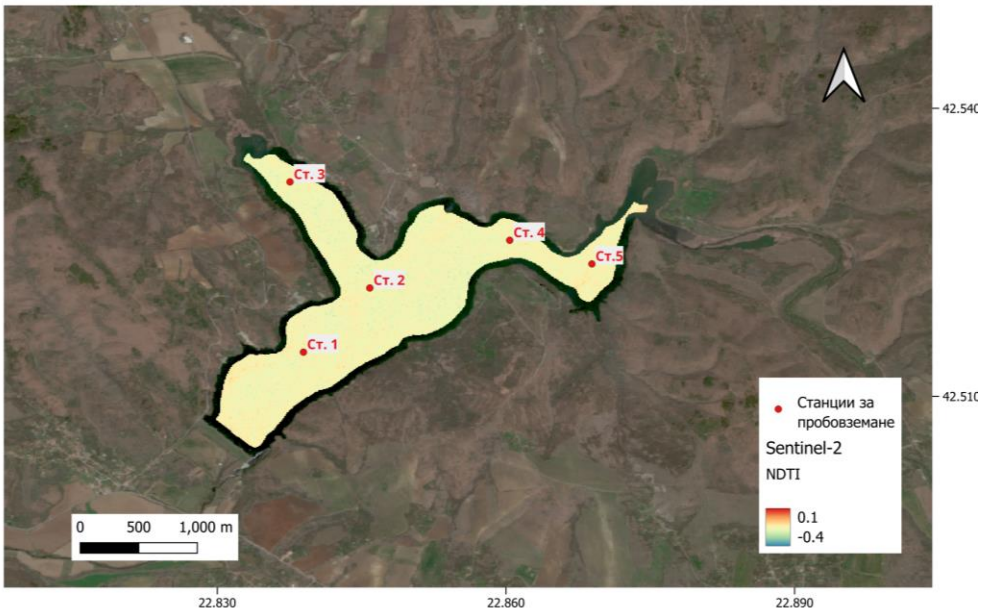
Фиг. 1. Изображение в естествени цветове на язовир „Пчелина“ по данни от Sentinel-2

Резултати

В настоящото изследване за тематичната обработка на данните и изчисляване на стойностите на индекса NDTI е използван ГИС софтуер с отворен код QGIS. Изчислените стойности на NDTI в това изследване и от двата сензора са в интервала от -0.4 до 0.1, като по-ниските стойности на индекса съответстват на водни площи с по-ниска мътност, докато по-високите означават по-висока такава. Получените карти на водното огледало и съответно мътността му са показани на фигури 2 и 3. Както се вижда на фигурите площите заети с вода са различни, което се дължи на различната ПРС на двата сензора и съответно пикселите по контура на обекта не предоставят надеждна информация относно мътността на водата. Тъй като ПРС на данните от L9 е по-ниска при обработката се формира контур на границата вода-суша, който е по-широк от този при

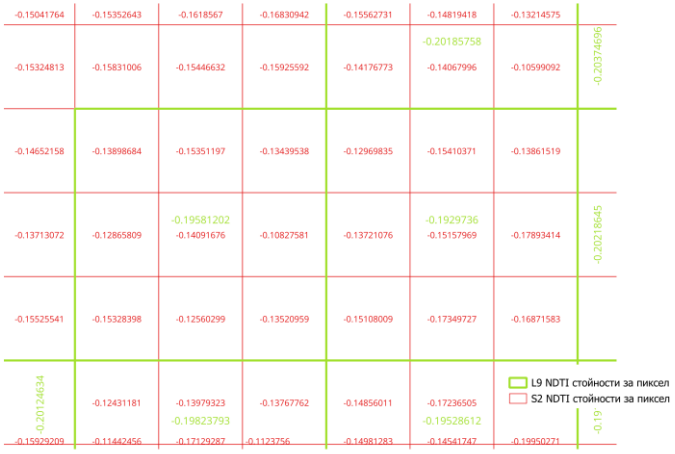


Фиг. 2. Изчислен NDTI индекс от Landsat-9 изображение на язовир „Пчелина“



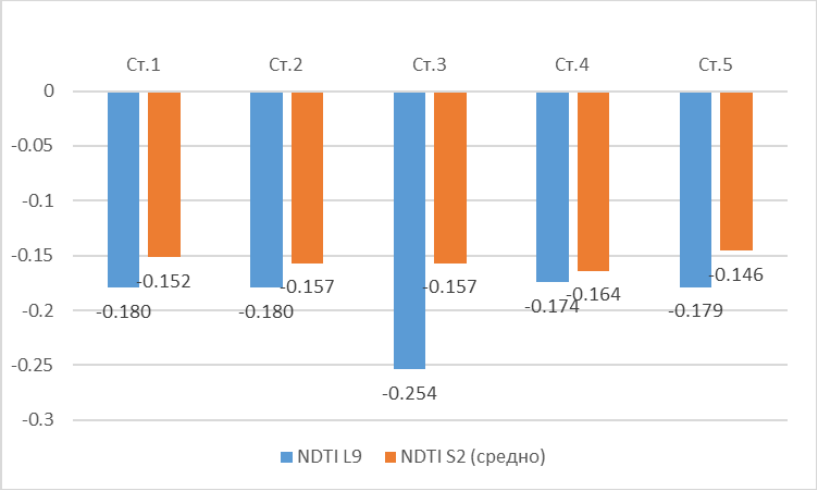
Фиг. 3. Изчислен NDTI индекс от Sentinel-2 изображение на язовир „Пчелина“

За да се проведе количествен анализ и допълнителна интерпретация на стойностите в двете изображения се наложи прехвърляне на NTDI стойностите в текстов формат. За тази цел от двете растерни изображения, съдържащи стойности на NDTI от двата източника бяха създадени векторни точкови слоеве, с чиято помощ бяха извлечени самите стойности на индекса. Както се вижда на фигура 4 площта на единичен пиксел от Landsat 9 изображението съответства на 9 пиксела от Sentinel 2 изображение, което е причина стойностите да не съвпадат напълно. Това наложи впоследствие усредняване на данните от Sentinel-2 изображението в рамките на единичен пиксел от Landsat 9 изображението и едва тогава те да се сравняват. Получените резултати показаха, че като цяло по-ниски стойности са изчислени за всички точки от Landsat 9 изображението, което най-вероятно се дължи на различната радиометрична разделителна способност на двата сензора.



Фиг. 4. Представяне на стойностните на NDTI индекса в пикселите на Landsat-9 и Sentinel-2

Пример за тези стойности е показан на фиг. 5, която показва изчислените стойности в избраните за пробовземане точки. По-ниската стойност за станция 3 от изображението на Landsat е възможно да се дължи на нейното местоположение – в по-плитката и тясна част в ръкава на река Светля.



Фиг. 5. Сравнение на стойности на NDTI индекс за пикселите на Landsat 9 и Sentinel 2 в съответните станции на пробовземане. Стойностите на индекса от изображение на Sentinel 2 са средно аритметично от 9 пиксела, съответстващи на 1 пиксел от Landsat 9.

Заключение

За да се приемат за надеждни резултатите е необходима валидация на резултатите получени от сателитните данни с данни от проведени теренни измервания, което ще позволи създаване на модел привързващ изчисленият индекс NDTI с измерена на място прозрачност на водата. Следва да се отбележи, че данните с по-ниска пространствена разделителна способност от Landsat 9 не дават достатъчна информация за зоните близки до границата вода-суша. Затова по-високата пространствена разделителна способност на Sentinel-2 изображенията позволява изследване на по-голяма площ от водното тяло. Приложената методика за изчисляване на индекси от двата източника на данни е приложима и при оценка на хлорофилно съдържание за водни площи.

Благодарности

Това изследване е направено по обучителната докторантска програма на секция „Системи за дистанционни изследвания“ към ИКИТ-БАН.

Литература:

1. Държавна агенция за метрологичен и технически надзор - https://dams.damtn.government.bg/index.php?option=com_webregister&view=item&Itemid=126&formdata[id]=552 линкът е активен към 31.08.2026 г.
2. Кожухаров, Д. 1994. Анализ на качествения състав на зоопланктона в системата р. Струма – яз. „Пчелина“ през 1990–1992 г.
3. Министерство на околната среда и водите – https://www.moew.government.bg/bg/vodi/povurhnostni-vodi/kompleksni-i-znachimi-yazoviri/
4. Dewantoro M. D. R. et al., 2024 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1343 012027.
5. Кожухаров, Д. 2019. Лимнология, с. 253.
6. Attila, J., et al., Use of Earth observation tools in support of the WFD – State of play for ecological status monitoring and assessment in surface waters of Europe, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2025, https://data.europa.eu/doi/10.2760/3790150, JRC142686
7. European Space Agency. Sentinel-2 User Handbook; ESA Standard Document; ESA: Paris, France, 2015.
8. The Landsat 9 (L9) Data Users Handbook; U.S. Geological Survey (USGS) and National Aeronautics and Space Administration (NASA); LSDS-2082, Version 1.0, February 2022.
9. U.S. Geological Survey (USGS) – https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-9
10. U.S. Geological Survey (USGS) Earth Explorer – https://earthexplorer.usgs.gov
11. ACOLITE User Manual (QV – April 21, 2026), (c) RBINS 2014-2026
12. European Space Agency – https://step.esa.int/main/wp-content/help/versions/13.0.0/snap-toolboxes/eu.esa.opt.opttbx.radiometric.indices.ui/ndti/NdtiAlgorithmSpecification.html