

УДК 577:574.42

## ИНФОРМАТИВНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЛЕЙ

© 2019 г. Т.И. Письман, А.П. Шевырногов, А.А. Ларько, И.Ю. Ботвич, Д.В. Емельянов,  
А.А. Шпедт\*, Ю.Н. Трубников\*

*Институт биофизики СО РАН, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/50*

*\*Научно-исследовательский институт сельского хозяйства, 660041, Красноярск, Свободный просп., 66*

*E-mail: irina.pugacheva@mail.ru*

Поступила в редакцию 02.04.2019 г.

После доработки 02.04.2019 г.

Принята к публикации 08.05.2019 г.

Представлены результаты спутникового мониторинга растительности неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения в течение вегетационного периода 2018 г. Объектом исследования являются залежи разных возрастов (2 года, 7 и 20 лет) и поля под паром на территории землепользования Красноярского научно-исследовательского института сельского хозяйства. Для дешифрирования залежей и полей под паром использовались спутниковые данные высокого пространственного разрешения (спутники дистанционного зондирования Земли Sentinel-2) с уровнем предварительной обработки Level-1C (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). На основе этих данных рассчитаны вегетационные индексы NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и почвенные индексы NDSI (Normalized Difference Soil Index). Разработаны алгоритмы и программы для обработки данных со спутников Sentinel-2. На основе динамики вегетационного индекса NDVI показана возможность идентификации и контроля состояния залежей и полей под паром в течение вегетационного периода. Показана применимость почвенного индекса NDSI для оценки состояния пахотных земель.

*Ключевые слова: залежные земли, поля под паром, Sentinel-2, NDVI, NDSI.*

**DOI:** 10.1134/S0006302919040136

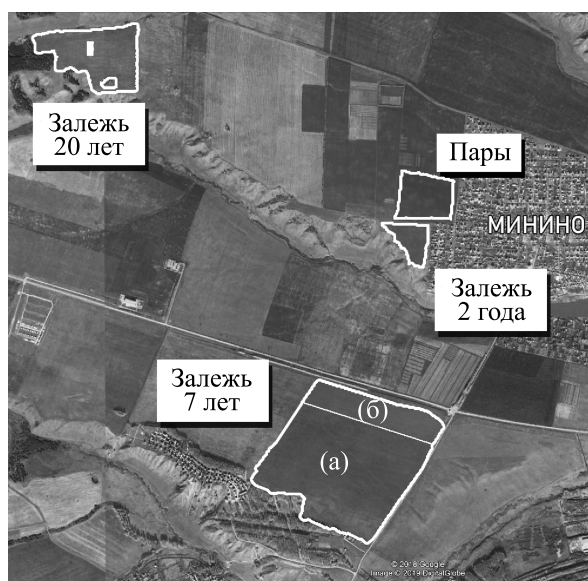
По данным Управления Росреестра по Красноярскому краю площадь сельхозугодий в регионе составляет 4921,7 тыс. га, в том числе пашня — 2966,2 тыс. га, залежь — 125,5 тыс. га, сенокосы — 669,2 тыс. га, пастбища — 1145,7 тыс. га. Фактически не используется 1136,6 тыс. га ранее распаханых земель, которые, по нашему мнению, являются разновозрастными залежными землями. В «Геоботаническом словаре» [1] дано следующее определение: «Залежь — поле, оставленное без обработки более чем на год. На залежи происходит постепенное восстановление естественной растительности, свойственное данному ландшафту». В «Толковом словаре по почвоведению» [2] залежью называется «нераспахиваемый и незасеваемый участок земли, использовавшийся ранее для выращивания сельскохозяйственных культур». Исследование закономерностей развития растительного покрова залежей актуально в связи с

тем, что в агроландшафтах они выполняют ряд функций, связанных с восстановлением почвенного покрова. В растительных покровах залежных земель идут динамические процессы, обусловленные совокупностью ландшафтных и климатических факторов. Актуальность исследования современного состояния залежных земель определяется перспективами их использования в будущем, в том числе и для прогноза производства зерна.

Чистый пар — поле севооборота, свободное от возделывания культур в течение всего вегетационного периода или основной его части. Актуальность мониторинга земель, находящихся в состоянии чистого пара, обуславливается необходимостью контроля за соблюдением технологических требований и регламентов содержания этих полей.

Для объективного учета и выбора идеологии использования и вовлечения в пахотный фонд залежных земель необходимо проведение их инвентаризации на уровне административного района и хозяйства. Для эффективного использования

*Сокращения:* NDVI — дифференциальный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index), NDSI — почвенный индекс (Normalized Difference Soil Index).



**Рис. 1.** Карта полей опытно-производственного хозяйства «Минино». Семилетняя залежь: (а) — до кошения, (б) — после кошения.

залежных земель потребуются меры по формированию агроландшафтов с оптимальным соотношением сельскохозяйственных угодий в зависимости от специализации хозяйства. При планировании возврата в пахотный фонд залежных земель необходимо учитывать критерии пахотно-пригодности почв этих массивов. Указанные мероприятия невозможно реализовать без применения современных методов дистанционного зондирования Земли [3,4].

Интенсивное развитие спутникового зондирования Земли открыло новые возможности оперативного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения, в том числе залежных земель и полей под паром [5,6]. Для оценки динамики растительности залежных земель используется в основном нормализованный дифференциальный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [7].

В настоящее время в практике дистанционного зондирования используются данные высокого пространственного разрешения со спутников дистанционного зондирования Земли Sentinel-2 [8,9]. Для повышения точности дешифрирования спутниковых снимков привлекаются данные наземного спектрометрирования [10].

Целью работы является применение и апробация методов спутникового мониторинга состояния залежных земель и полей под паром.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования являются неиспользуемые земли сельскохозяйственного назначения (залежи разных возрастов — 2 года, 7 и 20 лет) и поля под паром на территории землепользования опытно-производственного хозяйства «Минино» (рис. 1).

Поля расположены в южной части Красноярской лесостепи, в 5–7 км от г. Красноярска. Географические координаты: широта —  $56^{\circ}4'35''$ ; долгота —  $92^{\circ}4'49''$ . Территория землепользования — равнинная, южная, открытая, достаточно теплая часть лесостепи с выраженными остепенными участками, удобными для пашни. Данные суточного количества осадков над исследуемой территорией в течение вегетационного периода 2018 г. получены с сайта [www.rp5.ru](http://www.rp5.ru).

Для оценки возраста и структуры разновозрастных залежей выбраны три тестовых участка: залежь (2 года) на черноземе (бурьянистая стадия), залежь (7 лет) на черноземе (стадия корневищных злаков) и залежь (20 лет) на темно-серой лесной почве (дерновинная стадия). Определение срока залежи выполняли по растительному покрову согласно методическим рекомендациям [11].

Для дешифрирования залежей и полей под паром использовали информацию, полученную со спутников дистанционного зондирования Земли Sentinel-2, с уровнем предварительной обработки Level-1C (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). На этапе предварительной обработки проводили атмосферную коррекцию данных до уровня Level-2A

**Таблица 1.** Видовой состав и плотность растительности разновозрастных залежей

Возраст и тип залежи	Доминирующие виды растений, %	Доля многолетних растений, %	Доля однолетних растений, %	Плотность, шт./м <sup>2</sup>
2 года, бурьянистая залежь	Ячмень обыкновенный ( <i>Hordeum vulgare</i> ) – 41.2%, щетинник зеленый ( <i>Setaria viridis</i> ) – 16.0%	25.7	74.3	34
7 лет, корневищная залежь	Пырей ползучий ( <i>Elytrigia repens</i> ) – 65.8%, льнянка обыкновенная ( <i>Linaria vulgaris</i> ) – 17.4%	73.4	26.6	113
20 лет, дерновинная залежь	Пырей ползучий ( <i>Elytrigia repens</i> ) – 23.6%, донник лекарственный ( <i>Melilotus officinalis</i> ) – 23.1%	83.0	17.0	938

путем использования процессора Sen2Cor и набора инструментов Sentinel-2 Toolbox для программного обеспечения Sentinel Application Platform (<http://step.esa.int/main>). Далее полученные данные использовали для расчета вегетационного индекса NDVI и почвенного индекса NDSI (Normalized Difference Soil Index):

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

$$NDSI = \frac{(GREEN - YELLOW)}{(GREEN + YELLOW)}. \quad (2)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Залежная сукцессия – сложный процесс восстановления исходной растительности. Залежи формируются в случае прекращения механической обработки полей после возделывания сельскохозяйственных культур. Процесс восстановительных сукцессий залежей разных возрастов зависит от длительности использования пашни, типа почв, площади и способа использования залежных участков [12]. В таблице представлен видовой состав растительности разновозрастных залежей. Для бурьянистой (двухлетней) стадии залежи характерно наличие в растительном покрове большой доли (до 74%) однолетников. Корневищная (семилетняя) стадия залежи также имеет значительную долю однолетних растений. За 20 лет пребывания участка в залежном состоя-

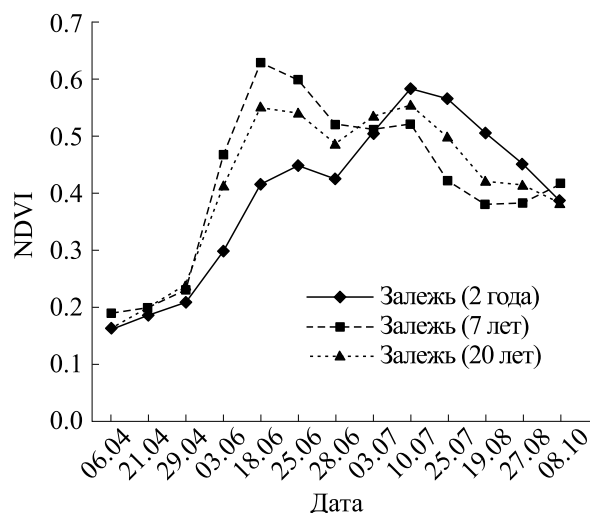
нии (дерновинная стадия) происходит восстановление естественной растительности, увеличивается доля многолетних растений.

Спутниковый мониторинг растительности разновозрастных залежей и полей под паром проведен на основе анализа сезонной динамики вегетационного индекса NDVI и почвенного индекса NDSI. Главным преимуществом вегетационных индексов является легкость их получения и широкий диапазон решаемых с их помощью задач.

Расчет большей части вегетационных индексов базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках кривой спектральной отражательной способности растений. На красную зону спектра (0,62–0,75 мкм) приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а на ближнюю инфракрасную зону (0,75–1,3 мкм) – максимальное отражение энергии клеточной структурой листа. Отношение этих показателей друг к другу позволяет четко отделять растительность от прочих природных объектов.

Наиболее популярный и часто используемый вегетационный индекс NDVI для растительности принимает положительные значения, и чем большую проектную площадь занимает зеленая фитомасса, тем он выше. На значения индекса влияет также видовой состав растительности, ее сомкнутость, состояние, угол наклона поверхности, цвет почвы под разреженной растительностью [10].

На рис. 2 представлены результаты сезонной динамики вегетационного индекса NDVI для раз-



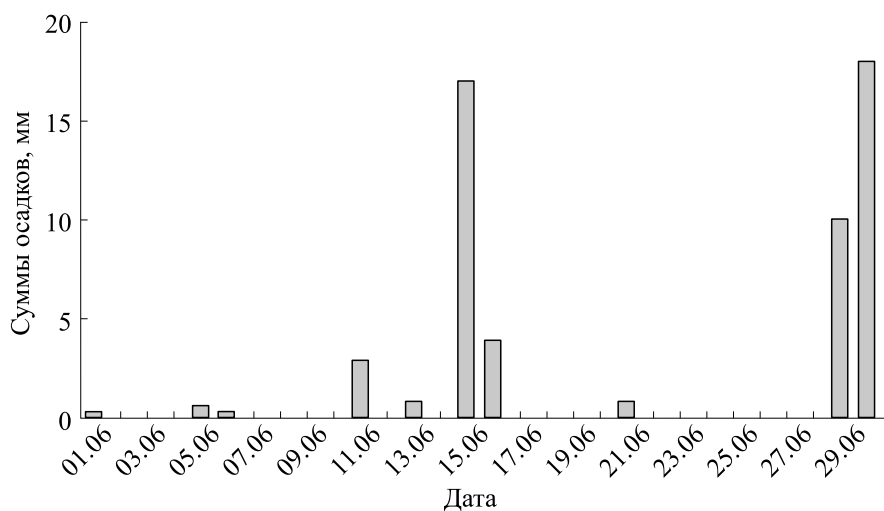
**Рис. 2.** Динамика вегетационного индекса NDVI залежных земель разных возрастов в течение вегетационного периода 2018 г.

новообразных залежей, различающихся между собой доминирующими видами растительности и пространственной плотностью ее распределения. Исследуемые залежи различаются величиной NDVI и соответственно количеством надземной фитомассы растительности. В первую половину вегетационного периода значения NDVI семилетней залежи значительно выше значений NDVI двухлетней залежи. Далее значение NDVI двухлетней залежи продолжает увеличиваться, в то время как значение NDVI семилетней залежи падает, что говорит об уменьшении фотосинтезирующей биомассы. Как было показано в результате ботанического обследования (таблица), исследуемые залежи отличаются видовым составом и

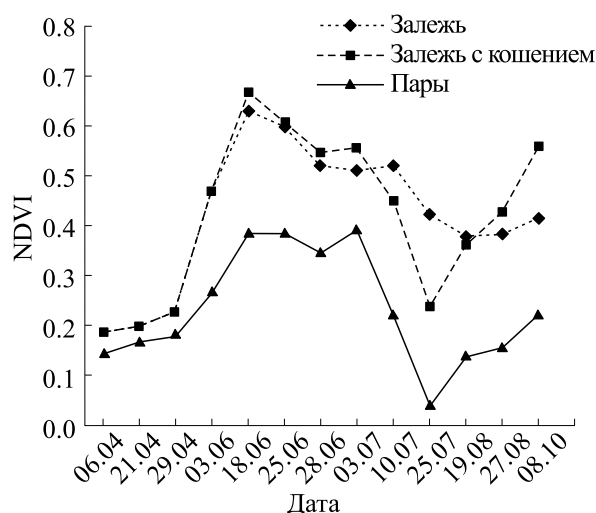
плотностью растительного покрова, которые оказывают прямое влияние на величину NDVI.

Необходимо отметить, что на всех тестовых участках одновременно (28.06.2018 г.) произошло уменьшение значений NDVI (рис. 2). Анализ суточного количества осадков в течение вегетационного периода 2018 г. (рис. 3) показал отсутствие осадков в течение 10 дней (с 17.06.2018 по 28.06.2018), что отразилось на морфологическом состоянии растений и повлекло снижение значений NDVI на всех опытных участках.

На рис. 4 представлены результаты сравнительного анализа спутниковых данных семилетних залежей без кошения, с кошением и полей под паром. Показано, что динамика NDVI иссле-



**Рис. 3.** Суточное количество осадков в июне 2018 г.

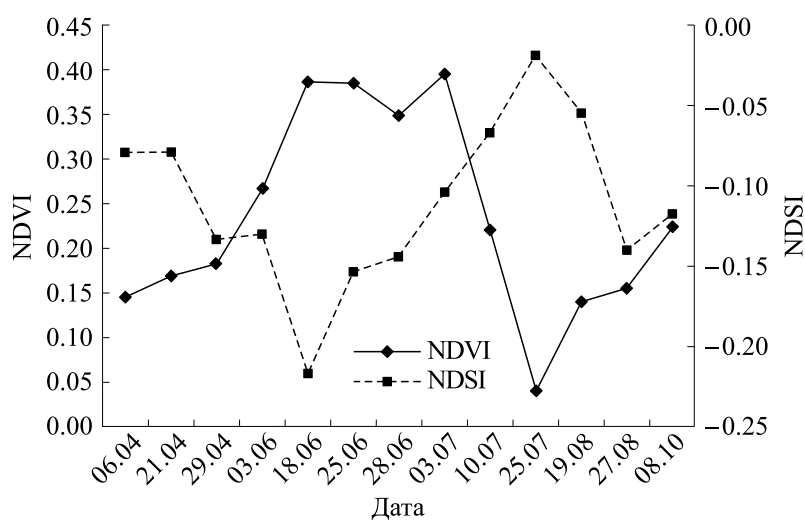


**Рис. 4.** Динамика NDVI растительности семилетней залежи (до кошения и после кошения травы) и полей под паром по спутниковым данным в течение вегетационного периода 2018 г.

двумя территориями различается в течение вегетационного сезона. Для отработки метода контроля состояния залежных земель проведено исследование залежей для двух случаев: без кошения и с кошением травы. Ранней весной растительность залежей зеленеет в обоих случаях – вегетационный индекс NDVI растет до 0,65. После кошения трав значение NDVI резко падает до 0,23, что говорит об уменьшении биомассы растительности залежей. Действительно, в случаях эксплуатации территорий как сенокосов после каждого укоса трав наблюдается падение NDVI [13]. В летний период растительность залежи без кошения по мере созревания начинает засыхать и желтеть. Индекс NDVI соответственно постепенно снижа-

ется. После кошения происходит отрастание травы, вследствие чего на этом поле происходит увеличение вегетационного индекса NDVI по сравнению с полем залежи без кошения.

Динамика вегетационного индекса NDVI поля под паром отличается от динамики NDVI растительности залежей (рис. 4). В весенний период значение вегетационного индекса NDVI поля под паром растет до 0,4, что говорит о появлении растительности и нарушении технологии парования. Далее на основе анализа спутниковых данных показано, что на исследуемом поле под паром хорошо распознается дата проведения распашки (25.07.2018) – индекс NDVI резко уменьшается от 0,4 (разреженная растительность) до 0,05 (оголен-



**Рис. 5.** Динамика вегетационного (ромбы) и почвенного (квадраты) индексов поля под паром в течение вегетационного периода по данным спутников Sentinel-2.

ная почва). На подавляющем большинстве используемых сельскохозяйственных угодий как минимум раз в год происходит распашка. Таким образом, в эти сроки обрабатываемое поле должно характеризоваться признаками оголенной почвы, которые соответствуют более низким значениям вегетационного индекса NDVI, чем растительный покров [14].

Идентификация открытой поверхности почвы является актуальной в космическом мониторинге земель сельскохозяйственного назначения. Наличие этих данных позволит контролировать соблюдение севооборотов. На современном этапе развития методов обработки космических снимков актуальным является автоматизация выделения участков открытой почвы. Среди методов дешифрирования особенно перспективен метод спектральных индексов. Среди всего разнообразия спектральных индексов особый интерес для дешифрирования открытой почвы представляет почвенный индекс NDSI, который определяется несколькими параметрами: содержанием воды, распределением почвенных частиц по размеру и т.д.

Изменение почвенного индекса NDSI находится в противофазе с изменением вегетационного индекса NDVI (рис. 5). Применимость почвенного индекса особенно актуальна для идентификации пахотных земель. Так, значение почвенного индекса NDSI 25.07.2018 г., после вспашки, максимально, в то время как значение вегетационного индекса NDVI минимально. В течение всего вегетационного сезона, когда существенно влияние растительности на спектры отражения, корреляция между вегетационным индексом NDVI и почвенным индексом NDSI сильная ( $r = -0,733$ ). Такие факторы, как влажность почвы, ее плотность, структура, а также микро- и мезорельеф поверхности поля различным образом влияют на показатели NDVI и NDSI. В целом показано, что почвенный индекс NDSI отражает объективное состояние полей под паром и может быть использован для идентификации пахотных земель.

## ВЫВОДЫ

В результате ботанических исследований растительности залежей разных возрастов показано, что сукцессия залежей характеризуется увеличением плотности, видового разнообразия и доли многолетних видов растений, типичных для целинной растительности.

Разработаны программы для обработки спутниковых данных высокого пространственного разрешения Sentinel-2 неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения (залежей) и полей под паром.

На основе динамики вегетационного индекса NDVI показана возможность идентификации и контроля состояния залежей и полей под паром в течение вегетационного периода.

Показана применимость почвенного индекса NDSI для оценки состояния пахотных земель.

Исследование выполнено в рамках Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования» на 2018–2020 гг. (проект № 74) и Гос. задания (№ госрегистрации: АААА-А17-117013050027-1).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б. А. Быков, Геоботанический словарь (Наука, М., 1973).
2. А. А. Роде, *Толковый словарь по почвоведению* (Наука, М., 1975).
3. А. А. Шпедт и Ю. Н. Трубников, Достижение науки и техники АПК **31** (4), 5 (2017).
4. J. Stefanski, T. Kuemmerle, O. Chaskovsky, et al., *Remote Sensing* **6** (6), 5279 (2014). doi: 10.3390/rs6065279.
5. А. М. Берзин и В. А. Полосина, *Вестн. КрасГАУ* **3**, 39 (2018).
6. C. S. A. Wallace, P. Thenkabail, J. R. Rodriguez, et al., *GIScience and Remote Sensing*, **54** (2), 258 (2017). DOI: 10.1080/15481603.2017.1290913.
7. Э. А. Терехин, *Географич. вестн.* **2** (41), 118 (2017).
8. N. Kolecka, C. Ginzler, R. Pazur, et al., *Remote Sensing* **10** (8), 1221 (2018). DOI: 10.3390/rs10081221.
9. U. Kanjir, N. Duric, and T. Veljanovski, *Int. J. Geo-Inf.* **7**, 405 (2018). DOI: 10.3390/ijgi7100405.
10. А. П. Шевырногов, Т. И. Письман, Н. А. Кононова и др., *Исследование Земли из космоса* **6**, 39 (2018).
11. М. И. Степанов, А. И. Сысо, А. С. Чумбаев и др., *Методические рекомендации по определению сроков пребывания земельных участков сельскохозяйственного назначения Новосибирской области в залежном состоянии* (Наука, Новосибирск, 2017).
12. О. Г. Бембеева и Р. Р. Джапова, *Изв. Самарского научного центра РАН* **14** (1), 1195 (2012).
13. Э. А. Терехин, *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса* **12** (1), 9 (2015).
14. С. А. Барталев, В. А. Егоров, Е. А. Лупян и др., *Компьютерная оптика* **35** (1), 103 (2011).

## The Information Content of Spectral Vegetation Indices for Interpretation of the Satellite Images of Agricultural Fields

T.I. Pisman\*, A.P. Shevyrnogov\*, A.A. Larko\*, I.Y. Botvich\*, D.V. Emelyanov\*,  
A.A. Shpedt\*\*, and Y.N. Trubnikov\*\*

*\*Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Akademgorodok 50/50, Krasnoyarsk, 660036 Russia*

*\*\*Agricultural Research Institute, Svobodny prosp. 66, Krasnoyarsk, 660041 Russia*

The results of satellite monitoring and botanical description of unused agricultural lands during the growing season 2018 are presented. The objects of the study were sod fields of various ages (2, 7 and 20 years) and bare-fallow soils which were parcels of Krasnoyarsk Agricultural Research Institute land use. Sentinel-2 satellite image data of high spatial resolution with Level-1C processing (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) were used to provide sod field and bare fallow soils insights. Based on these data, vegetation indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and soil indices NDSI (Normalized Difference Soil Index) were calculated. Algorithms and programs for processing Sentinel-2 satellite data were developed. Based on the dynamics of the NDVI, the possibility of identifying and monitoring the state of sod fields and bare fallow soils throughout the vegetation period was shown, as well as the applicability of the NDSI in assessing the suitability of arable land was demonstrated.

*Keywords: sod fields, bare-fallow soil, Sentinel-2B, NDVI, NDSI*