

## ВЕГЕТАЦИОННЫЕ ИНДЕКСЫ. ОСНОВЫ, ФОРМУЛЫ, ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Миков С. И.

*Научный руководитель – д. т. н., профессор Старовойтов В. В.,*

*к. ф.-м. н., доцент Бояршинова О. А.*

*БНТУ*

**Аннотация.** Сельское хозяйство – самая популярная отрасль, которая реализует на практике такие преимущества спутниковых данных, как масштабный охват территории, точность результатов, высокая частота сбора данных. Это означает, что за любой территорией, будь то маленькое поле или целая большая страна, можно наблюдать из космоса с определенным интервалом времени.

**Ключевые слова:** агромониторинг, вегетационные индексы, дистанционное зондирование Земли.

Дистанционное зондирование Земли предполагает получение информации о земной поверхности и атмосферы на расстоянии, как правило, с помощью спутников или летательных аппаратов, оснащенных датчиками. Эта технология позволяет собирать данные и изучать Землю, включая почвенный покров, растительность, водные объекты, атмосферные условия и изменения с течением времени.

К ключевым моментам дистанционного зондирования Земли относятся:

1. Датчики и платформы. Системы дистанционного зондирования используют различные типы датчиков для обнаружения и регистрации электромагнитного излучения на различных длинах волн. Эти датчики могут улавливать видимое, инфракрасное, тепловое или микроволновое излучение. Дистанционное зондирование может проводиться с помощью спутников, бортовых платформ (самолетов, беспилотных летательных аппаратов) или даже наземных датчиков.

2. Методы визуализации. Методы дистанционного зондирования могут быть как визуализирующими, так и невизуализирующими. Системы обработки изображений собирают данные в виде изображений, что позволяет проводить пространственный анализ и визуализацию. Системы, не использующие визуализацию, измеряют конкретные свойства или характеристики земной поверхности или атмосферы, такие как температура или концентрация газа.

3. Области применения. Дистанционное зондирование имеет множество применений, в частности, используется в сельском хозяйстве для мониторинга состояния сельскохозяйственных культур, оценки урожайности и выявления болезней. В лесном хозяйстве это помогает оценивать состояние лесных

массивов, отслеживать обезлесение и управлять ресурсами. Мониторинг окружающей среды опирается на дистанционное зондирование для изучения изменений в землепользовании, составления карт роста городов, мониторинга качества воды и обнаружения стихийных бедствий. Играет важную роль в исследованиях климата, составлении карт морского льда, измерении параметров атмосферы и анализе энергетического баланса Земли.

4. Анализ данных. Данные дистанционного зондирования обрабатываются и анализируются для извлечения значимой информации. Это включает в себя такие методы, как классификация изображений, извлечение признаков и обнаружение изменений. Для интерпретации и извлечения ценной информации из огромного объема доступных данных дистанционного зондирования используются передовые алгоритмы и подходы к машинному обучению.

5. Мультиспектральная и гиперспектральная визуализация. Дистанционное зондирование может использовать мультиспектральную или гиперспектральную визуализацию. Мультиспектральные датчики собирают данные в нескольких определенных спектральных диапазонах, таких как красный, зеленый и синий, наряду с дополнительными диапазонами в ближней инфракрасной или тепловой областях. Гиперспектральные датчики собирают данные во многих узких и смежных спектральных диапазонах, предоставляя подробную информацию о составе и свойствах объектов на поверхности Земли.

6. Временной и пространственный анализ. Данные дистанционного зондирования могут быть проанализированы как во времени, так и в пространстве. Временной анализ предполагает изучение изменений с течением времени путем сравнения изображений, сделанных в разные даты. Пространственный анализ исследует закономерности, взаимосвязи и распределение объектов и особенностей внутри изображения или на нескольких изображениях.

7. Объединение данных. Данные дистанционного зондирования могут быть объединены с другими источниками геопространственных данных, такими как данные географических информационных систем (ГИС), топографические карты или климатические данные, для расширения возможностей анализа и принятия решений.

Вегетационный индекс – это количественный показатель, используемый для оценки и анализа свойств, состояния и плотности растительности на основе данных дистанционного зондирования. Эти показатели рассчитываются на основе значений коэффициента отражения, полученных при различных длинах волн света, обычно регистрируемых спутниковыми или бортовыми датчиками. Индексы растительности дают ценную информацию о различных аспектах растительности, включая рост, стресс, продуктивность и изменения почвенного покрова.

Некоторые часто используемые индексы растительности:

1. Нормализованный разностный индекс растительности (*NDVI*). Измеряет разницу между коэффициентами отражения ближнего инфракрасного

(*NIR*) и красного (*RED*) света, деленную на их сумму. *NDVI* широко используется для оценки плотности и состояния растительности.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}},$$

где  $\rho_{NIR}$  – значения пикселей из ближнего инфракрасного канала;

$\rho_{RED}$  – значения пикселей из красного канала.

2. Усовершенствованный вегетационный индекс (*EVI – Enhanced Vegetation Index*) представляет собой «оптимизированный» вегетационный индекс, предназначенный для усиления сигнала растительности с повышенной чувствительностью в регионах с высокой биомассой и улучшенным мониторингом растительности за счет отделения фонового сигнала растительного покрова и уменьшения влияния атмосферы.

$$EVI = \frac{2,5(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{\rho_{NIR} + 6\rho_{RED} - 7,5\rho_{BLUE} + 1}$$

3. Индекс простого отношения (*SR*):

$$SR = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}}$$

4. Суммарный индекс зеленого (*SGI*) – одним из простейших индексов вегетации, используемых для обнаружения изменений в зелени растительности. Поскольку свет сильно поглощается зеленой растительностью в этой спектральной области, индекс *SGI* очень чувствителен к небольшим изменениям, например, к тому, что может произойти при волнении леса. Значение этого индекса колеблется от 0 до более чем 50 (в единицах % отражения). Обычный диапазон для зеленой растительности составляет от 10 до 25 процентов.

5. Атмосферно-устойчивый индекс растительности (*ARVI – Atmospherically Resistant Vegetation Index*) сводит к минимуму влияние атмосферного рассеяния (из-за аэрозолей, таких как дождь, туман, пыль, дым или загрязнение воздуха.) на визуализацию.

$$ARVI = \frac{\rho_{NIR} - (2\rho_{RED} - \rho_{BLUE})}{\rho_{NIR} + 2(\rho_{RED} - \rho_{BLUE})}$$

6. Вегетационный индекс с поправкой на почву (*SAVI*) – Модифицированная версия *NDVI*, направленная на минимизацию влияния яркости почвы. *SAVI* включает в расчет поправочный коэффициент грунта для учета изменений коэффициента отражения грунта.

7. Нормализованный разностный водный индекс (*NDWI*): фокусируется на обнаружении присутствия водных объектов. *NDWI* использует разницу

между коэффициентами отражения зеленого и ближнего света, деленную на их сумму, что делает его чувствительным к изменениям содержания воды.

8. Индекс хлорофилла (*CI*): оценивает содержание хлорофилла в растительности, которое тесно связано со здоровьем растений и фотосинтетической активностью. *CI* рассчитывается с использованием соотношений различных спектральных диапазонов, таких как красный край и красные длины волн.

9. Индекс площади листьев (*LAI*): количественно определяет величину площади листовой поверхности на единицу площади почвы. *LAI* предоставляет информацию о структуре растительности, плотности и потенциальной продуктивности.

10. Индекс содержания хлорофилла в кроне (*CCCI*): измеряет концентрацию хлорофилла в кроне, которая связана с фотосинтетической способностью и продуктивностью растений. *CCCI* часто используется для оценки физиологического состояния сельскохозяйственных культур.

Эти растительные индексы позволяют ученым, исследователям и практикам анализировать и интерпретировать данные дистанционного зондирования, способствуя лучшему пониманию динамики растительности. Так на рис. 1 приведен спектр отражения листьев ряда растений [1].

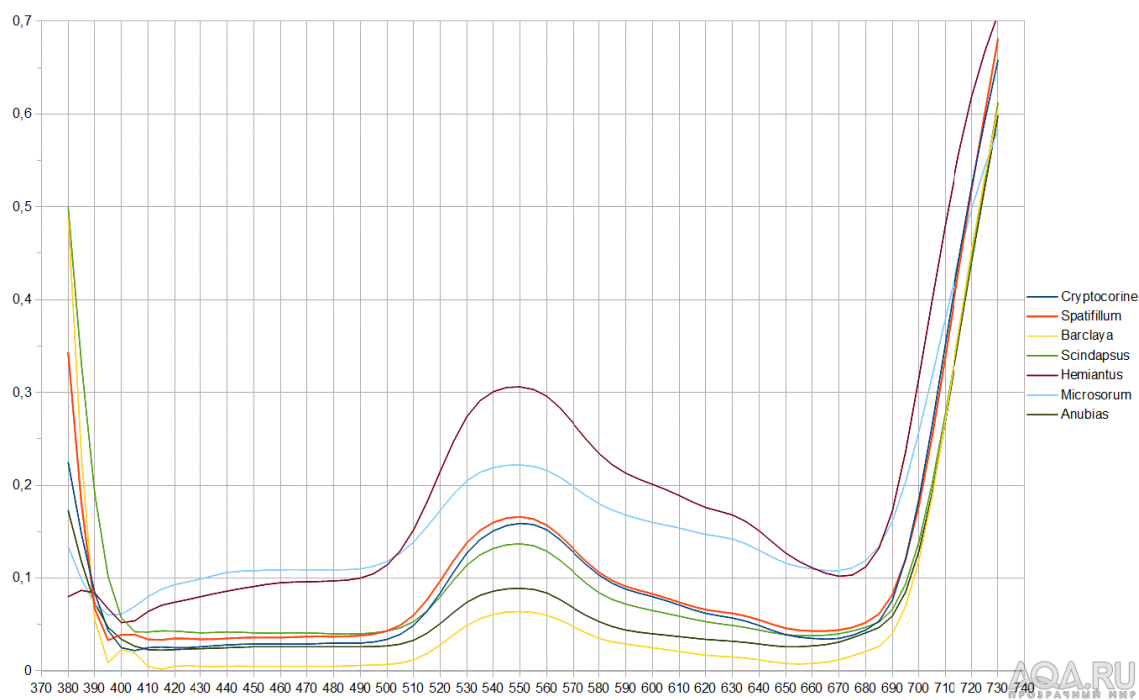


Рис. 1. Спектр отражения листьев растений

Наиболее активно используемым индексом является нормализованный вегетационный индекс (показатель биомассы, активной для фотосинтеза) (см. формула 1). Значения *NDVI* для растительности обычно варьируются приблизительно от  $-1$  до  $1$ . Низкие значения *NDVI* ( $-1$ ) часто связаны с по-

верхностями, не покрытыми растительностью, такими как голая почва, камни или водоемы. Эти области имеют низкую отражательную способность в ближнем инфракрасном диапазоне (*NIR*) и относительно более высокую отражательную способность в красном диапазоне. Значения *NDVI*, близкие к нулю, могут указывать на районы с разреженной или напряженной растительностью, а также районы, покрытые облаками или снегом. Эти области имеют сходные значения коэффициента отражения как в инфракрасном, так и в красном диапазонах длин волн. Значения от 0 до 0,3 обычно представляют районы с умеренным растительным покровом. Они могут указывать на участки с лугами, кустарниками или ландшафтами с редкой растительностью. Значения от 0,3 до 0,6 часто ассоциируются со здоровым и густым растительным покровом. Они указывают на районы с лесами, сельскохозяйственными культурами или другими густо заросшими растительностью ландшафтами. Значения выше 0,6 указывают на очень густую и здоровую растительность. Эти значения часто наблюдаются в районах с густыми лесами или высокопродуктивных сельскохозяйственных регионах.

Важно отметить, что конкретная интерпретация значений *NDVI* может варьироваться в зависимости от района исследования, типа растительности и времени года. Сравнение с историческими или базовыми данными по конкретному интересующему региону может обеспечить более точную оценку условий растительности и изменений с течением времени. Кроме того, разные виды растений могут демонстрировать различия в своих показателях *NDVI*, поэтому важно учитывать контекст и характеристики растительности при интерпретации значений *NDVI* для конкретного исследования или применения.

Способы использования *NDVI* в сельском хозяйстве:

1. Отличие растительности от других типов покровов: *NDVI* позволяет различать области с растительностью от безлесных областей (рис. 2), таких как голый грунт, вода или негодные земли. Это может быть полезно для картографирования сельскохозяйственных угодий и выделения площадей, где имеется растительный покров.

2. Оценка общего состояния растительности: *NDVI* может давать представление об общем здоровье и состоянии растительности на участках. Низкие значения *NDVI* могут указывать на проблемы в росте растений, такие как стресс, патологические процессы или недостаток влаги, в то время как высокие значения *NDVI* могут свидетельствовать о здоровой и плодородной растительности.

3. Визуализация участков с растительностью на карте: путем применения *NDVI* к спутниковым или аэрокосмическим изображениям можно создать карты, где регионы с более высокими значениями *NDVI* будут указывать на

участки с более плотной и здоровой растительностью. Это помогает агроному отслеживать изменения растительного покрова на его угодьях.

4. Обнаружение аномалий в росте: мониторинг изменений *NDVI* со временем может помочь выявить аномалии или необычные паттерны в росте растительности. Это может указывать на проблемы, такие как болезни растений, неправильное использование удобрений или непредвиденные факторы воздействия, которые могут требовать вмешательства или дополнительного анализа.



Рис. 2. Участки обезлесения

Расчет индекса *NDVI* возможен на основе любых снимков высокого, среднего или низкого разрешения, у которых имеются каналы в инфракрасном (0,55–0,75 мкм) и красном диапазонах (0,75–1,0 мкм).

Для визуализации индекса *NDVI* часто используется стандартизованная непрерывная градиентная шкала цветов. Обычно используются следующие цвета:

Стандартная градиентная шкала *NDVI* начинается с красного цвета, который обычно представляет области с низкими значениями *NDVI* (–1 или близкие к нулю). Затем цвета переходят в желтый или зеленый, представляющий средние значения *NDVI*. Наивысшие значения *NDVI* (близкие к 1) отображаются с помощью ярких зеленых или синих цветов (рис. 3).

Такая градиентная шкала позволяет визуально выделить различные степени «зелености» и здоровья растительности. Часто используется цветовая схема «красный-желтый-зеленый» или «красный-синий-зеленый».

Однако важно отметить, что конкретные цвета и градиенты могут варьироваться в зависимости от программного обеспечения или инструментов, используемых для визуализации *NDVI*.

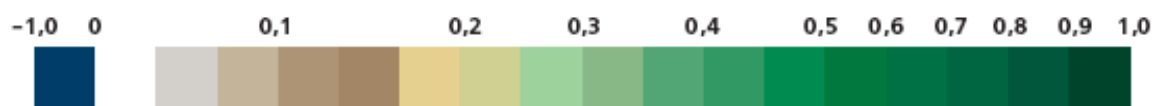


Рис. 3. Стандартизованная непрерывная градиентная

В начале сезона вегетации, когда растения только начинают развиваться, отражение в красном канале обычно выше, а в ближнем инфракрасном канале ниже. Это связано с тем, что растения содержат еще мало зеленой фитомассы, и большая часть поглощенной энергии из видимого спектра используется для фотосинтеза.

По мере развития растений и увеличения зеленой фитомассы, отражение в красном канале уменьшается, тогда как отражение в ближнем инфракрасном канале увеличивается. Это связано с тем, что здоровая зеленая растительность хорошо поглощает энергию в красном спектре для фотосинтеза и отражает большую часть ближнего инфракрасного излучения.

На пике сезона вегетации, когда растительность наиболее густая и здоровая, отражение в красном канале достигает минимума, а отражение в ближнем инфракрасном канале достигает максимума.

Изменение отражающей способности растительности в этих каналах позволяет использовать индексы, такие как *NDVI*, для оценки здоровья и фенологического состояния растительности в течение сезона вегетации (рис. 4).



Рис. 4. Изменения в поглотительной способности ослабленного растения

Для расчета индекса *NDVI* (наиболее распространенной комбинацией каналов спутников является использование красного (*RED*) и ближнего инфракрасного (*NIR*) каналов спектра.

Некоторые комбинации каналов, используемые для расчета *NDVI*:

1. Каналы 3 (*RED*) и 4 (*NIR*) для спутников Landsat:
  - Канал 3 (*RED*) охватывает диапазон видимого красного света (0,63–0,69 мкм);
  - Канал 4 (*NIR*) охватывает ближний инфракрасный спектр (0,77–0,90 мкм).
2. Каналы 4 (*RED*) и 5 (*NIR*) для спутников Sentinel-2:
  - Канал 4 (*RED*) охватывает диапазон видимого красного света (0,64–0,67 мкм);
  - Канал 5 (*NIR*) охватывает ближний инфракрасный спектр (0,84–0,88 мкм).
3. Каналы 2 (*RED*) и 4 (*NIR*) для спутников MODIS:
  - Канал 2 (*RED*) охватывает диапазон видимого красного света (0,62–0,67 мкм);
  - Канал 4 (*NIR*) охватывает ближний инфракрасный спектр (0,84–0,88 мкм).
4. Каналы 3 (*RED*) и 8A (*NIR*) для спутников Landsat-8:
  - Канал 3 (*RED*) охватывает диапазон видимого красного света (0,63–0,69 мкм);
  - Канал 8A (*NIR*) охватывает ближний инфракрасный спектр (0,75–0,90 мкм).

Дистанционное зондирование Земли произвело революцию в нашей возможности контролировать и понимать нашу планету, предоставлять ценную информацию для научных исследований, управлять природными ресурсами, контролировать стихийные бедствия, городское планирования и многие другие применения. По мере дальнейшего развития технологий дистанционное зондирование будет играть все более важную роль в решении глобальных проблем.

Индексы растительности играют важную роль в дистанционном зондировании и анализе растительности. Они предоставляют ценную информацию о состоянии растительности, густоте, продуктивности и других важных характеристиках. Используя различные комбинации спектральных диапазонов и значений коэффициента отражения, эти индексы позволяют исследователям и практикам оценивать и отслеживать динамику растительности в различных масштабах.

Индексы растительности, такие как *NDVI*, *EVI*, *SAVI*, *NDWI*, *CI*, *LAI* и *CCCI*, широко используются в различных областях, включая сельское хозяйство, лесоводство, мониторинг окружающей среды и управление земельными ресурсами. Они помогают выявлять растительный стресс, оценивать состояние сельскохозяйственных культур, отслеживать изменения в почвенном покрове, изучать экологическую динамику и выявлять области потенциального нарушения или деградации растительности.

Благодаря достижениям в области спутниковых технологий и доступности данных дистанционного зондирования высокого разрешения индексы растительности дают ценную информацию для процессов принятия решений, связанных с сельским хозяйством, управлением лесным хозяйством, природоохранными мероприятиями и исследованиями изменения климата. Эти индексы служат мощными инструментами для количественной оценки и анализа состояния растительности, позволяя принимать обоснованные решения и проводить целенаправленные мероприятия.



В целом, индексы растительности играют важную роль в нашем понимании экосистем Земли, позволяя нам отслеживать и оценивать здоровье и продуктивность растительности, выявлять изменения с течением времени и поддерживать методы устойчивого управления.

**Список использованных источников:**

1. Спектры отражения листьев растений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.aqa.ru/forum/spektryi-otrajeniya-listev-rasteniy-307817-1>. – Дата доступа: 15.02.2023.