

УДК: 62.01.00:631:004

ПРИМЕНЕНИЕ ИНДЕКСА ХЛОРОФИЛЛА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФИЦИТА ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЯХ МЕТОДОМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

**Бектуров Мирлан Таалайбекович (0009-0008-2118-9013),
Жумабекова Айгерим Жумабековна (0000-0002-0832-1525),
Конурбаева Гулзат Уларбековна (0000-0003-0425-7287),**

Кыргызский национальный аграрный университет им. К. И. Скрябина, Бишкек, Кыргызстан

Аннотация: в данной научной статье рассматривается использование дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для мониторинга состояния сельскохозяйственных культур в Чуйской области Кыргызстана. Специальное внимание уделяется расчету индекса хлорофилла (CI) для выявления дефицита питательных веществ. Применение данных со спутников Sentinel-2 показало высокую эффективность метода для оперативного выявления проблем на полях.

Ключевые слова: Космические снимки Sentinel-2, программное обеспечение QuantumGIS, NDVI, CL, ГИС технологии, ДЗЗ.

АЙЫЛ ЧАРБА ӨСҮМДҮҮЛӨРҮНДӨ АЗЫК ЗАТТАРЫНЫН ЖЕТИШСИЗДИГИН АРАЛЫКТАН ЗОНДОО БЫКМАСЫ МЕНЕН АНЫКТОО ҮЧҮН ХЛОРОФИЛЛ ИНДЕКСИН КОЛДОНУУ

**Бектуров Мирлан Таалайбекович (0009-0008-2118-9013),
Жумабекова Айгерим Жумабековна (0000-0002-0832-1525),
Конурбаева Гулзат Уларбековна (0000-0003-0425-7287),**

К. И. Скрябин атындагы Кыргыз улуттук агрардык университети, Бишкек, Кыргызстан

Аннотация: Бул илимий макалада Кыргызстандын Чүй облусундагы айыл чарба өсүмдүктөрүнүн абалына мониторинг жүргүзүү үчүн аралыктан зонддоо (EPS) колдонулушу талкууланат. Аш болумдуу заттардын жетишсиздигин аныктоо үчүн хлорофилл индекси (CI) эсептөөгө өзгөчө басым жасалат. Sentinel-2 спутниктеринин маалыматтарын колдонуу талаалардагы көйгөйлөрдү тез аныктоо методунун жогорку натыйжалуулугун көрсөттү.

Өзөктүү сөздөр: Sentinel-2 спутник сүрөттөрү, QuantumGIS программасы, NDVI, RCL, ГИС технологиялары, алыстан байкоо.

APPLICATION OF CHLOROPHYLL INDEX TO DETECT NUTRIENT DEFICIENCY IN AGRICULTURAL PLANTS BY REMOTE SENSING

**Bekturov Mirlan Taalaibekovich (0009-0008-2118-9013),
Zhumabekova Aigerim Zhumabekovna (0000-0002-0832-1525),
Konurbaeva Gulzat Ularbekovna (0000-0003-0425-7287)**

Kyrgyz National Agrarian University named after K.I. Skryabin, Bishkek, Kyrgyzstan

Annotation: *this scientific article discusses the use of Earth remote sensing (ERS) to monitor crop conditions in Chui Oblast, Kyrgyzstan. Special attention is paid to the calculation of the chlorophyll index (CI) to identify nutrient deficiencies. The use of Sentinel-2 satellite data has shown the high efficiency of the method for promptly identifying problems in the fields.*

Keyword: *Sentinel-2 satellite images, QuantumGIS software, NDVI, RCL, GIS technologies, remote sensing*

1. Введение

Сельское хозяйство играет важную роль в экономике страны. Одной из ключевых задач агрономов является своевременное выявление дефицита питательных веществ, что критически важно для повышения урожайности. Традиционные методы мониторинга состояния растений, основанные на наземных измерениях, обладают рядом недостатков, таких как высокая трудоемкость и задержка в получении результатов. В последние годы активно развивается использование технологий дистанционного зондирования, которые позволяют оперативно получать данные о состоянии здоровья сельскохозяйственных растений на больших территориях.

Наиболее известным и распространённым спектральным индексом для мониторинга здоровья растительности является NDVI (normalized difference vegetation index) – нормализованный разностный вегетационный индекс. 1(Черепанов А.С. 2011.).

Но индекс NDVI имеет определенный минус, который мы рассмотрим далее. В связи с этим, в данной статье мы будем использовать иной вегетационный индекс.

Хлорофилл является практически незаменимым пигментом для преобразования световой энергии в запасаемую химическую энергию и содержание хлорофилла может напрямую определять фотосинтетический потенциал растения. Кроме того, Хлорофилл дает косвенную оценку состояния питательных веществ, поскольку большая часть азота листьев включена в хлорофилл, а также содержание хлорофилла тесно связано со стрессом растений и его старением. 2 (Гительсон А.А., Гриц Ю., Мерзляк М.Н. 2003.)

Индекс хлорофилла используется для расчета общего содержания хлорофилла в листьях. Значения CIgreen и CIred-edge чувствительны к небольшим изменениям содержания хлорофилла и одинаковы для большинства видов.

$CI_{\text{зеленый}} = \rho_{\text{NIR}} / \rho_{\text{зеленый}} - 1 = \rho_{730} / \rho_{530} - 1$

$CI_{\text{красный край}} = \rho_{\text{NIR}} / \rho_{\text{red_edge}} - 1 = \rho_{850} / \rho_{730} - 1$

Полоса с красным краем — это узкая полоса в спектре отражения растительности между переходом красного цвета в ближний инфракрасный диапазон.



Рис.1

Общее содержание хлорофилла линейно коррелирует с разницей между обратным коэффициентом отражения зеленых и красных краевых полос, ближней ИК-полосы.

Карты растительности, построенные на основе индекса CI, могут быть более точными, чем карты, основанные на NDVI. Объясняется это тем что, NDVI используется для оценки плотности биомассы, которая не всегда коррелирует со здоровьем урожая. 3(EOS Data Analisis 2022)

В отличие от NDVI, индекс хлорофилла не становится «насыщенными» по мере созревания растительного покрова. Это позволяет индексу хлорофилла давать более достоверную информацию о здоровье растений в течение всего сезона.

Особенно необходимость замены NDVI на индекс хлорофилла возникает, когда смыкание крон составляет около 80%, то есть примерно во время ранних фаз старения (конец июля, август). Это время измерение содержания хлорофилла в растениях является более надежным способом определения состояния растений.

2. Материал и методы исследования

Актуальность работы связана с достижением нового уровня информационного обеспечения растениеводства, базирующегося на материалах дистанционного зондирования Земли и современных ГИС-технологиях.

Цель настоящего исследования – реализация научно-методических основ оценки состояния сельскохозяйственных культур по материалам спутниковых снимков, прежде всего, в части определения дефицита питательных веществ с помощью вегетационного индекса RCI. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Анализ существующих методов мониторинга сельскохозяйственных культур с использованием вегетационных индексов.
2. Расчет индекса хлорофилла (RCI) на основе данных спутниковых снимков Sentinel-2.
3. Сравнение эффективности индекса хлорофилла (RCI) с NDVI.

Создание индексных карт CL было выполнено на основе мультиспектральных снимков серии Sentinel-2. 4 (ESA Sentinel-2 [Электронный ресурс])

С помощью калькулятора растров, в программе QGIS. Использовалась традиционная формула вычисления индекса RCI:

$$CI_{\text{красный край}} = \rho_{\text{NIR}} / \rho_{\text{red-edge}} - 1 = \rho_{842} / \rho_{705} - 1$$

где NIR – отражение в ближнем инфракрасном канале снимка;

красный край – отражение в красном крае канала снимка.

Исследовали космические снимки с марта по август 2023 года, со спутника

Sentinel-2 на территорию поля вблизи села Предтечинка, Московского района Чуйской области. Площадь выбранного участка составляет 130 Га. (Рис.1)

Всего было обработано 6 снимков, которые отображают вегетационный период 2023 г. по датам: 14 марта, 13 апреля, 13 мая, 17 июня, 17 июля и 16 августа. Выбор дат съёмки обусловлен наименьшей облачностью.

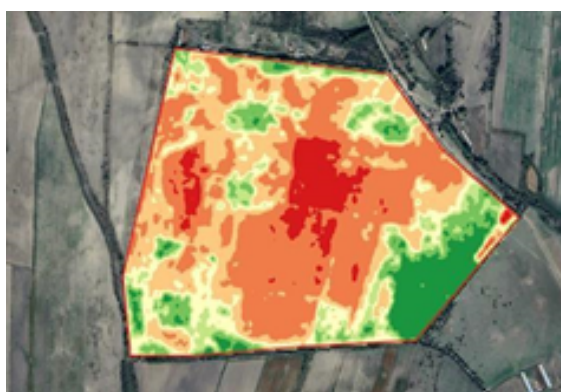
Для наглядности индексной карты RCL полученное изображение классифицировано на 7 классов в цветах

от красного до зелёного (цветовая схема RdYlGn). Статистическая обработка RCL была выполнена по Excel таблицам.

Также был выполнен расчет индекса NDVI, для статистического сравнения.

3. Результаты исследования

Для наглядного сравнения вегетационных индексов можно использовать графические изображения, полученные с помощью спутниковых систем. На изображениях можно заметить следующие различия (Рис.2):



NDVI

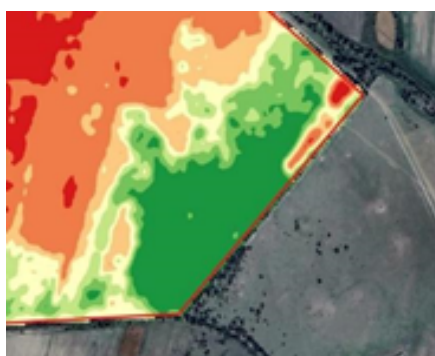


RCL

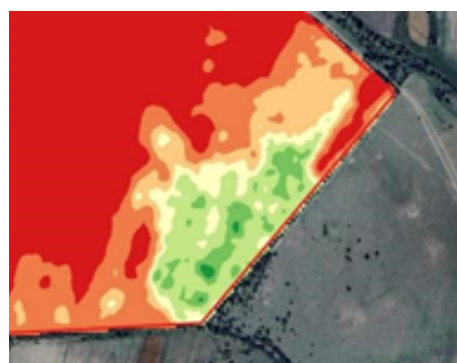
С. Предтеченка, Московский р-н, Чуйская область. Дата:13.05.24

Рис.2

CL: Изображение более четко дифференцирует участки с густой растительностью, что позволяет выявить зоны стресса (Рис.3).



NDVI



RCL

С. Предтеченка, Московский р-н, Чуйская область. Дата:13.05.24

Рис.3

NDVI: Изображение обычно показывает общую биомассу растительности, где более высокие значения (зеленые тона) соответствуют более густой и здоровой растительности.

Статистическое сравнение

Так как индекс CL является не нормализованным, мы его не можем сравнить с NDVI, поэтому мы сначала нормализовали статистические значения данных индекса CL.

Для этого мы использовали формулу минимально-максимальной нормализации.

Минимально-максимальная нормализация – это простой метод, который преобразует данные таким образом, что все значения находятся в диапазоне от 0

до 1. Формула минимально-максимальной нормализации выглядит следующим образом:

$$x' = (x - \min(x)) / (\max(x) - \min(x)) \text{ где;}$$

x – исходное значение,

x' – нормализованное значение,

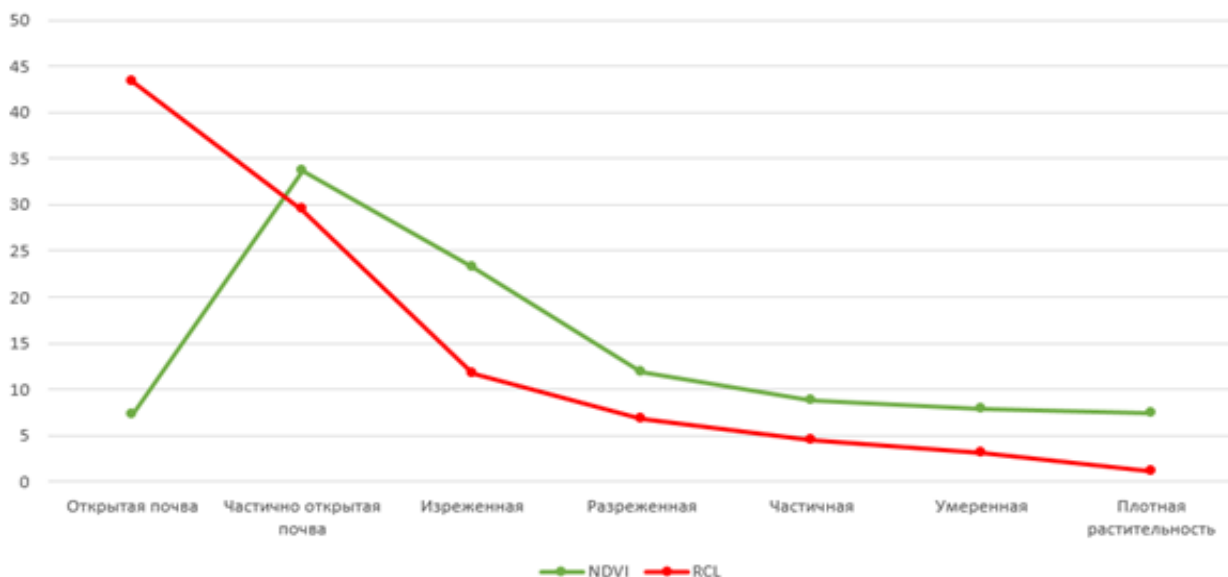
min(x) и max(x) – минимальное и максимальное значения в наборе данных соответственно.

Первый этап сравнения включает построение совмещенных графиков по типу поверхности, вегетационных индексов NDVI и RCL на основе одного снимка (датированного 13.05.23) для проведения статистического анализа индексных изображений.

Таб.1 Статистическое сравнение по типу поверхности

Тип поверхности:	Открытая почва	Частично открытая	Изреженная растительность	Разреженная растительность	Частичная растительность	Умеренная растительность	Плотная растительность
NDVI	7,23	33,68	23,25	11,83	8,79	7,83	7,38
RCL	43,39	29,44	11,65	6,78	4,54	3,07	1,12

Графики NDVI, RCL в зависимости от типа поверхности (в %) для месяца май



При сравнении вегетационных индексов RCL, GCL и NDVI выявляются различные особенности их поведения в зависимости от типа поверхности и плотности растительности. Значения RCL и GCL незначительно различаются в зонах открытой и частично открытой почвы, но имеют высокую степень схожести в зонах с преобладающей растительностью. NDVI демонстрирует более значительные различия по сравнению с обоими индексами, особенно в зонах открытой почвы. В зонах частично открытой почвы различия

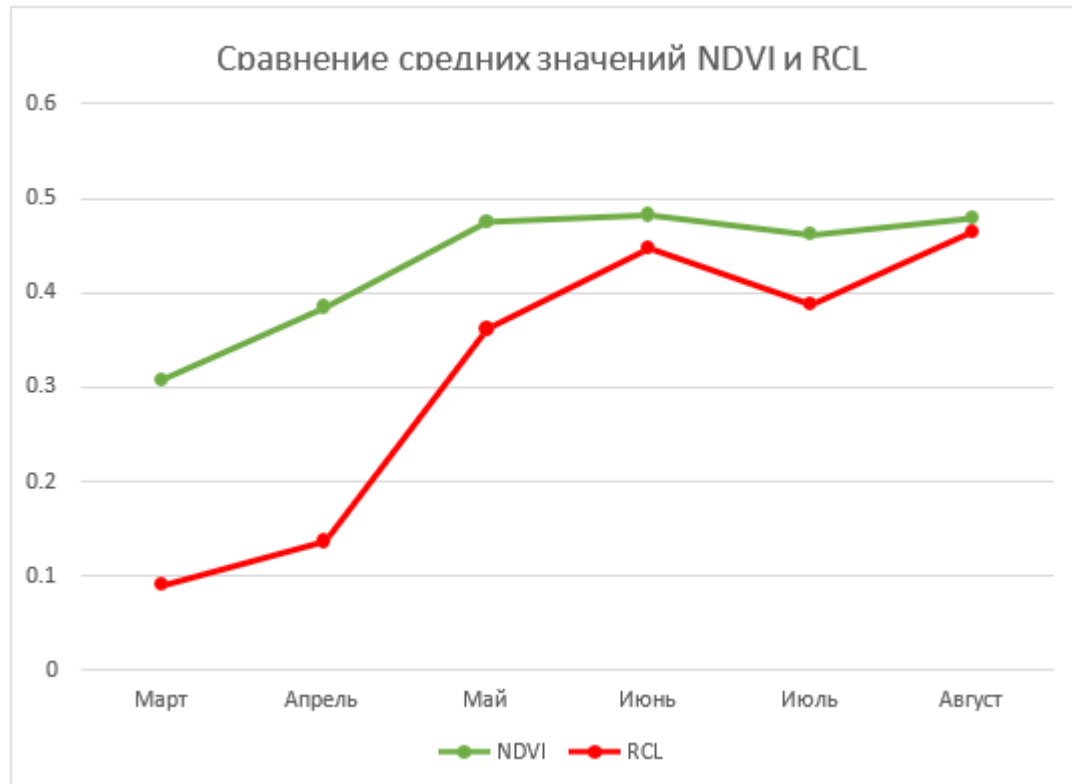
между NDVI и RCL/GCL становятся менее выраженными, но остаются заметными. В зонах с преобладающей растительностью все три индекса показывают схожие тренды, но на разных уровнях, что отражает их различную чувствительность к спектральным характеристикам растительности.

Второй этап сравнения основывается на построении совмещенных графиков средних значений NDVI и RCL по месяцам (с апреля по август, 2023г.).

График средних значений

Таб.2 Средние значения NDVI и RCL по месяцам

Месяцы:	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август
NDVI	0,307	0,3838	0,4752	0,4821	0,4611	0,4789
RCL	0,0891	0,1356	0,3608	0,4462	0,3864	0,4643



вегетационных индексов NDVI и RCL выявляет их сходные сезонные тенденции: оба индекса демонстрируют рост весной и снижение растительности, с более плавными изменениями у NDVI и более детализированными колебаниями у RCL. В период с мая по июнь наблюдается слабый рост уровня растительности, а в августе значения индексов практически сравниваются. Это отражает синхронность реакции индексов на сезонные изменения и различную чувствительность к физиологическому состоянию растений. Несмотря на различия в плавности изменений, оба индекса предоставляют комплексное понимание состояния растительности.

4. Дискуссия

В рамках исследования, посвященного применению индекса хлорофилла для выявления дефицита питательных веществ в сельскохозяйственных растениях методом дистанционного зондирования, важно учесть, что спектры поглощения и отражения играют ключевую роль в оценке состояния растений. Важнейшими аспектами, выявленными в работах Гительсона, Марка и Мерзняка, являются характеристики поглощения света в различных спектральных диапазонах и их влияние на точность оценки содержания хлорофилла и, соответственно, дефицита питательных веществ.

В синем и красном спектральных диапазонах коэффициенты поглощения хлорофилла значительно высоки, что связано с интенсивным поглощением света этими диапазонами (Лихтенталер, 1987)5. В результате, глубина проникновения света в листья в этих областях спектра ограничена, что приводит к насыщению поглощения даже при небольшом содержании хлорофилла. Как показали исследования, при концентрации хлорофилла более 150 мкмоль/м², общее поглощение достигало максимума (более 90%), и дальнейшее увеличение содержания пигмента не приводило к заметному увеличению общего

поглощения (Гительсон и Мерзняка, 1995)6. Это наблюдение указывает на то, что зависимость отношения поглощения ($R\lambda$)–1 от содержания хлорофилла выравнивается, становясь менее чувствительной к его концентрации (Томас Ж.Р, Гаусман (1977)7

В отличие от синего и красного диапазонов, в зеленом и красном крае спектра поглощение света хлорофилла относительно низкое, не превышающее 6% от поглощения в синем и красном диапазонах (Лихтенталер, 1987)5. Однако, зеленые листья поглощают более 80% падающего света в этих областях. Данная высокая степень поглощения, несмотря на низкий коэффициент поглощения хлорофилла в этих диапазонах, и значительная глубина проникновения света в листья (в четырех-шесть раз выше по сравнению с синим и красным диапазонами) обуславливают высокую чувствительность ($R\lambda$)–1 к содержанию хлорофилла и предотвращают насыщение этой зависимости даже при умеренных и высоких концентрациях хлорофилла (Гительсон и Мерзняка, 1995)6.

При сравнении ранее разработанных индексов оценки хлорофилла с индексами, предложенными в данной работе, мы провели анализ точности различных методов на основе имеющихся наборов данных:

Для неразрушающей оценки содержания хлорофилла было установлено, что три спектральных диапазона – около 550 ± 20 нм или 715 ± 20 нм, 450 ± 20 нм и ближний ИК-диапазон выше 750 нм – являются достаточными. Для листьев, содержащих антоцианы (Гительсон и др., 2001), рекомендуется использовать спектральные диапазоны 715 ± 20 нм, 450 ± 20 нм и ближний ИК-диапазон выше 750 нм. Применение широкополосных фильтров в рефлектометрах для оценки хлорофилла позволяет значительно повысить чувствительность и соотношение сигнал/шум, а также снизить стоимость рефлектометров. (Гительсон и др. 2001)8

5. Выводы.

Результаты анализа спутниковых снимков Sentinel-2 позволили выявить несколько важных аспектов, касающихся состояния сельскохозяйственных культур.

Во-первых, индекс хлорофилла (RCL) показал высокую чувствительность к изменениям в содержании питательных веществ в растениях. Исследование подтвердило, что снижение значения этого индекса соответствует зонам с дефицитом азота. Это подтверждается спектральным анализом отражательной способности растений, который выявил снижение поглощения в красной области спектра, характерное для растений с недостаточным уровнем хлорофилла.

Во-вторых, индекс NDVI, часто используемый для мониторинга общей биомассы, показал свою эффективность в определении состояния полей с более низкой плотностью растительности. Однако его чувствительность к дефициту питательных веществ оказалась ниже, чем у индекса GCL. Это связано с тем, что NDVI, в первую очередь, отражает общее состояние растительности, а не конкретные изменения в содержании хлорофилла.

На основе полученных данных было установлено, что использование индексов CL наиболее эффективно для раннего выявления дефицита питательных веществ. Это позволяет агрономам своевременно принимать корректирующие меры, что, в конечном итоге, способствует повышению урожайности.

Заключая, можно сказать, что дистанционное зондирование с использованием данных спутников Sentinel-2 и расчет индексов хлорофилла является мощным инструментом для мониторинга сельскохозяйственных культур. Эти методы позволяют не только оперативно выявлять проблемы, но и прогнозировать урожайность на основе динамики изменений вегетационных индексов.

6. Использованная литература

1. Черепанов А.С. (2011). Вегетационные индексы / Гоматика.
2. Гительсон А.А., Гриц Ю., Мерзляк М.Н., (2003) Взаимосвязь между содержанием хлорофилла в листьях и спектральнойотражательной способностью и алгоритмы неразрушающей оценки хлорофилла в листьях высших растений. / Journal of Plant Physiology.
3. EOS Data Analis (2022) ([url:https://eos.com/ru/make-an-analysis/chlorophyll-index/](https://eos.com/ru/make-an-analysis/chlorophyll-index/))
4. ESA Sentinel-2 [Электронный ресурс] /Mode of access ([url:https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2](https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2))
5. Лихтенталер ХК (1987) Хлорофилл и каротиноиды: Пигменты Фотосинтетические биомембраны. Meth Enzym 148: 331–382
6. Гительсон А., Мерзляк М.Н. (1996) Сигнатурный анализ отражательной способности листьев спектры: разработка алгоритма для дистанционного зондирования хлорофилла. J Plant Physiol 148: 494–500
7. Томас Ж.Р, Гаусман (1977) Отражательная способность листьев против хлорофилла листьев и концентрации каротиноидов для восьми культур. Agron J 69: 799 –802
8. Гительсон и др. (2001) Оптические свойства и неразрушающая оценка содержания антоцианов в растениях листья. Фотохимия Фотобиол 74: 38 –45