

Вегетационные индексы

Характерным признаком растительности и ее состояния является спектральная отражательная способность, характеризующаяся большими различиями в отражении излучения разных длин волн. Знания о связи структуры и состояния растительности с ее отражательными способностями позволяют использовать космические снимки для идентификации типов растительности и их состояния.

В настоящее время существует около 160 вариантов вегетационных индексов. Они подбираются экспериментально (эмпирическим путем), исходя из известных особенностей кривых спектральной отражательной способности растительности и почв. Краткий обзор индексов представлен в нижеприведенной таблице, куда включена характеристика многих индексов, рассчитываемых по данным в широких спектральных зонах (в том числе устойчивых к влиянию почв, атмосферы) и по данным в узких спектральных зонах.

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 отраже-

ние энергии клеточной структурой листа. То есть, высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с большой фитомассой растительности) ведет к более низким значениям коэффициентов отражения в красной зоне спектра и большим значениям в ближней инфракрасной. Как это хорошо известно, отношение этих показателей друг к другу позволяет четко отделять растительность от прочих природных объектов.

Наиболее популярный и часто используемый вегетационный индекс – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), который для растительности принимает положительные значения, и чем больше зеленая фитомасса, тем он выше. На значения индекса влияет также видовой состав растительности, ее сомкнутость, состояние, экспозиция и угол наклона поверхности, цвет почвы под разреженной растительностью.

Главным преимуществом вегетационных индексов является легкость их получения и широкий диапазон решаемых с их помощью задач. Так, NDVI часто используется как один из инструментов при проведении более сложных типов анализа, результатом которых могут являться карты продуктивности лесов и сельскохозяйственных земель, карты ландшафтов и природных зон, почвенные, аридные, фитогидрологические, фенологические и другие эколого-климатические карты.

Вегетационные индексы, предложенные и используемые разными авторами

Разновидность вегетационного индекса (ВИ)	Формула и краткое описание	Авторы
Индексы, рассчитываемые по значениям коэффициентов отражения в широких спектральных диапазонах		
Относительный ВИ (Ratio VI, RVI, Simple Ratio (SR))	$RVI = \left(\frac{P_{NIR}}{P_{RED}} \right)$ <p>Значения индекса изменяются от 0 до бесконечности. Для зеленой растительности значения $VI > 1$ и растут с увеличением зеленой фитомассы, сомкнутости растительности (обычно принимают значения 2–8)</p>	Birth и McVey, 1968 Jordan C.F., 1969 Rouse J.W. и др., 1973 Tucker C.J. и др., 1979

Разновидность вегетационного индекса (ВИ)	Формула и краткое описание	Авторы
Нормализованный разностный ВИ (Normalized Difference VI, NDVI)	$NDVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \right)$ <p>Индекс может принимать значения от -1 до 1. Для растительности индекс NDVI принимает положительные значения, обычно от 0.2 до 0.8</p>	Впервые описан Rouse B.J. и др., 1973, концепция впервые представлена Krieger F.J. и др., 1969
Усовершенствованный вегетационный индекс (Enhanced Vegetation Index, EVI)	$EVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C_1 \cdot \rho_{RED} - C_2 \cdot \rho_{BLUE} + L} \right) \cdot (1 + L)$ <p>Коэффициенты C_1, C_2 и L эмпирически установлены как равные 6.0, 7.5, и 1.0 соответственно (Huete и др., 1997). Индекс может принимать значения от -1 до 1. Для зеленой растительности обычны значения от 0.2 до 0.8</p>	Rouse J.W. и др., 1973 Tucker C.J., 1979 Jackson R.D. и др., 1983 Krieger F.J. и др., 1969 Sellers P.J., 1985 Huete A.R. и др., 1997
Инфракрасный вегетационный индекс (Infrared Percentage VI, IPVI)	$IPVI = \left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \right) = \left(\frac{NDVI + 1}{2} \right)$ <p>Функционально IPVI и NDVI эквивалентны. Индекс может принимать значения от 0 до 1. Для зеленой растительности характерны значения от 0.6 до 0.9</p>	Crippen R.E., 1990
Разностный вегетационный индекс (Difference VI, DVI)	$DVI = (\rho_{NIR} - \rho_{RED})$ <p>Индекс может принимать любые значения. Изовегетационные линии идут параллельно друг другу</p>	Lillesand T.M. и Kiefer R. W., 1987 Richardson и Everitt, 1992
Перпендикулярный вегетационный индекс (Perpendicular Vegetation Index (PVI))	$PVI = (\sin(a) \cdot \rho_{NIR} - \cos(a) \cdot \rho_{RED}),$ <p>где a – угол между почвенной линией и осью NIR Индекс может принимать значения от -1 до 1.</p> $PVI = \sqrt{(0.355 \cdot MSS_4 - 0.149 \cdot MSS_2)^2 + (0.355 \cdot MSS_2 - 0.852 \cdot MSS_4)^2}$	Richardson A.J. и Wiegand C.L., 1977
Взвешенный разностный вегетационный индекс (Weighted Difference VI, WDVI)	$WDVI = (\rho_{NIR} - g \cdot \rho_{RED})$ <p>где, g – наклон почвенной линии Связан с PVI примерно так же, как IPVI связан с NDVI. WDVI – это математически более простой вариант PVI, но он имеет неограниченный диапазон значений. Как и PVI, WDVI очень чувствителен к атмосферному воздействию (Qi и др., 1994)</p>	Clevers J.G., 1988
Трансформированный вегетационный индекс (Transformed Vegetation Index TVI)	$TVI = \sqrt{NDVI + 0.5}$ <p>0.5 прибавляется для исключения отрицательных значений под корнем. Функционально TVI и NDVI эквивалентны</p>	Tucker C.J. и др., 1979
Индексы, устойчивые к влиянию почвы		
Почвенный вегетационный индекс (Soil Adjusted VI, SAVI)	$SAVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} \right) \cdot (1 + L)$ <p>где, $L = [0; 1]$, $L = 0$ для очень густого растительного покрова, $L = 1$ для очень разреженного, чаще всего используют значение $L = 0.5$ (Huete и Liu, 1994). Значения индекса изменяются от -1 до 1. Линия почв проходит через точку 0</p>	Huete A.R., 1988 Huete A.R., и Liu H., 1994 Qi J. и др., 1994

Разновидность вегетационного индекса (ВИ)	Формула и краткое описание	Авторы
Модифицированный почвенный вегетационный индекс (Modified Soil Adjusted VI, MSAVI) Модифицированный почвенный вегетационный индекс – 2 (Modified Soil Adjusted VI – 2, MSAVI2)	$MSAVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} \right) \cdot (1 + L)$ <p>где, $L = 1 - 2 \cdot s \cdot NDVI \cdot WDV1$</p> $MSAVI2 = \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} \right) \cdot (1 + L)$ $L = 1 - \left(\frac{2 \cdot \rho_{NIR} + 1 - \sqrt{(2 \cdot \rho_{NIR} + 1)^2 - 8 \cdot (\rho_{NIR} - \rho_{RED})}}{2} \right)$ <p>s – наклон почвенной линии. MSAVI2 – это второй модифицированный почвенный индекс, как вариант MSAVI. Для расчета индекса не требуется нахождение почвенной линии и вычисление WDV1, NDVI. Значения индекса изменяются от –1 до 1. Линия почв может иметь различный наклон и проходит через точку 0</p>	Qi J. и др., 1994
Трансформированный почвенный вегетационный индекс (Transformed Soil Adjusted VI, TSAVI)	$TSAVI = \left(\frac{s \cdot (\rho_{NIR} - s \cdot \rho_{RED} - a)}{a \cdot \rho_{NIR} + \rho_{RED} - a \cdot s + s \cdot (1 + s^2)} \right)$ <p>где, a – координата пересечения почвенной линии с осью NIR (лежит между точкой 0;0 и точкой пересечения изовегетационных линий в индексе SAVI для $L=0.5$); s – наклон почвенной линии, X – коэффициент коррекции, для уменьшения почвенного шума (в оригинальной статье $X=0.08$)</p> <p>Значения индекса изменяются от –1 до 1. Линия почв может иметь различный наклон</p>	Baret F. и др., 1989 Baret F. и Guyot G., 1991
Индексы, устойчивые к влиянию атмосферы		
Индекс глобального мониторинга окружающей среды (Global Environmental Monitoring Index, GEMI)	<p>GEMI – Global Environmental Monitoring Index, индекс глобального мониторинга окружающей среды, разработанный Pinty и Verstraete. Они пытались избежать необходимости проводить детальную атмосферную коррекцию путем конструирования общей поправки за влияние атмосферы для вегетационного индекса.</p> $GEMI = E \cdot (1 - 0.25 \cdot E) - \left(\frac{\rho_{RED} - 0.125}{1 - \rho_{RED}} \right)$ $E = \left(\frac{2(\rho_{NIR}^2 - \rho_{RED}^2) + 1.5 \cdot \rho_{NIR} + 0.5 \cdot \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + 0.5} \right)$ <p>Значения индекса изменяются от 0 до 1</p>	Pinty B. и Verstraete M.M., 1991 Leprieux C. и др., 1994
Вегетационный индекс, устойчивый к влиянию атмосферы (Atmospherically Resistant Vegetation Index, ARVI)	$ARVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - Rb}{\rho_{NIR} + Rb} \right)$ <p>где, $Rb = \rho_{RED} - a \cdot (\rho_{RED} - \rho_{BLUE})$, как правило, $a=1$, при малом покрытии растительности и неизвестном типе атмосферы $a=0.5$ (Kaufman, Y. J., 1992)</p> <p>Первый атмосфероустойчивый вегетационный индекс, введен Kaufman and Tanre (1992). Он использует значение отражения в синей зоне, чтобы устранить влияние атмосферы на коэффициенты отражения в красной зоне.</p> <p>Значения индекса изменяются от –1 до 1. Линия почв может иметь различный наклон и проходит через точку 0</p>	Kaufman, Y.J., Tanre, D., 1992 Kaufman, Y.J., D. Tanre, 1996 Huete A.R., и Liu H., 1994

Разновидность вегетационного индекса (ВИ)	Формула и краткое описание	Авторы
Почвенный вегетационный индекс, устойчивый к влиянию атмосферы (Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index (SARVI))	$SARVI = \frac{\rho_{NIR} - p \cdot Rb}{\rho_{NIR} + p \cdot Rb},$ $p \cdot Rb = \rho_{RED} - \gamma(\rho_{BLUE} - \rho_{RED})$ <p>Huete and Liu (1994) также предложили провести такую замену и в индексе SAVI, получив индекс SARVI (атмосферостойчивый скорректированный почвенный вегетационный индекс)</p>	Huete A.R., и Liu H., 1994
Вегетационный индекс зелены (Green VI, GVI)	<p>Существует несколько GVI. В их основе лежит использование двух или более участков открытой почвы для построения почвенной линии, затем используется ортогонализация Грама-Шмидта (Gram-Schmidt orthogonalization), для нахождения «зеленой» линии («greenness» line), которая проходит через точку наиболее густого растительного покрова и перпендикулярна почвенной линии.</p> $GVI = -0.29 \cdot MSS_4 - 0.56 \cdot MSS_5 + 0.6 \cdot MSS_6 + 0.49 \cdot MSS_7,$ $GVI = -0.2848 \cdot TM_1 - 0.2435 \cdot TM_2 - 0.5436 \cdot TM_3 + 0.7243 \cdot TM_4 + 0.0840 \cdot TM_5 - 0.18 \cdot TM_7,$ <p>где MSS_n – яркость в n зоне системы MSS, аналогично для TM</p> <p>Значения индекса изменяются от -1 до 1. Линия почв может иметь различный наклон в n-мерном пространстве. Изовегетационные линии параллельны почвенной линии</p>	<p>Kauth R.G. и Thomas G.S., 1976 разработали 4-канальный вариант индекса для снимков MSS</p> <p>Crist E.P. и Cicone R.C., 1984 создали 6-канальный вариант для снимков TM</p> <p>Jackson R.D., 1983 описал, как создать n-канальную версию</p>
<p>Индексы, рассчитываемые по значениям коэффициентов отражения в узких спектральных диапазонах</p> <p>Использование этих индексов дает более точные результаты для оценки количества и состояния растительности. Использование отражения в узких спектральных каналах позволяет этим индексам фиксировать даже небольшие изменения состояния растительности. Но для расчета этих индексов необходимы данные в узких спектральных зонах (например, гиперспектральные).</p> <p>Индексы этой группы также отражают общее количество и состояние растительности. Эти индексы используют для расчетов данные о яркости в участке спектра от 690 до 740 нм, то есть рассматривают область инфракрасного склона (red edge)</p>		
Нормализованный разностный ВИ для области ближнего инфракрасного склона (Red Edge Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI_{0.705} = \left(\frac{\rho_{0.75} - \rho_{0.705}}{\rho_{0.75} + \rho_{0.705}} \right)$ <p>Индекс может принимать значения от -1 до 1. Для зеленой растительности обычно принимает значения от 0.2 до 0.9</p>	Gitelson A.A. и др., 1994 Sims D.A. и др., 2002
Модифицированный относительный ВИ для области ближнего инфракрасного склона (Modified Red Edge Simple Ratio Index)	$mSR_{0.705} = \left(\frac{\rho_{0.75} - \rho_{0.445}}{\rho_{0.75} + \rho_{0.445}} \right)$ <p>Индекс может принимать значения от 0 до 30. Для зеленой растительности обычно принимает значения от 2 до 8</p>	Datt B., 1999 Sims D.A. и др., 2002
Модифицированный нормализованный разностный ВИ для области ближнего инфракрасного склона (Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index)	$mNDVI_{0.705} = \left(\frac{\rho_{0.75} - \rho_{0.705}}{\rho_{0.75} + \rho_{0.705} - 2 \cdot \rho_{0.445}} \right)$ <p>Индекс может принимать значения от -1 до 1. Для зеленой растительности обычно принимает значения от 0.2 до 0.7</p>	Datt B., 1999 Sims D.A. и др., 2002

Разновидность вегетационного индекса (ВИ)	Формула и краткое описание	Авторы
1,2,3 индексы Вогельмана для области ближнего инфракрасного склона (Vogelmann Red Edge Index 1, Index 2, Index 3)	$VOG1 = \left(\frac{\rho_{0.74}}{\rho_{0.72}} \right) \quad VOG2 = \left(\frac{\rho_{0.734} - \rho_{0.747}}{\rho_{0.715} + \rho_{0.726}} \right) \quad VOG3 = \left(\frac{\rho_{0.734} - \rho_{0.747}}{\rho_{0.715} + \rho_{0.720}} \right)$ <p>Индекс может принимать значения от 0 до 20. Для зеленой растительности обычно принимает значения от 4 до 8</p>	Vogelmann J.E. и др., 1993
Индексы для оценки содержания влаги в растительном покрове		
Для расчетов этих индексов используются значения отражения в ближней инфракрасной и средней инфракрасной зонах спектра.		
Водный индекс (Water Band Index, WBI)	$WBI = \left(\frac{\rho_{0.900}}{\rho_{0.970}} \right)$ <p>Зеленая растительность обычно имеет значения от 0.8 до 1,2. Увеличение содержания воды в растениях приводит к увеличению поглощения в зоне около 970 нм относительно поглощения в зоне около 900 нм. Данный индекс применяется для анализа водного стресса, определения продуктивности, анализа пожароопасности, управления орошаемыми землями и др.</p>	Penuelas J. I. и др., 1995 Champagne C. и др., 2001
Нормализованный разностный водный индекс (Normalized Difference Water Index, NDWI)	$NDWI = \left(\frac{\rho_{0.857} - \rho_{1.241}}{\rho_{0.857} + \rho_{1.241}} \right)$ <p>Индекс может принимать значения от -1 до 1. Для зеленой растительности обычно принимает значения от -0,1 до 0,4</p>	Gao B.C., 1995
Индекс стресса влажности (Moisture Stress Index, MSI).	$MSI = \left(\frac{\rho_{1.599}}{\rho_{0.819}} \right) \quad MSI = \frac{TM_5}{TM_4}$ <p>Индекс может принимать значения от 0 до >3. Для зеленой растительности обычно принимает значения от 0.04 до 2. Содержание воды в листьях приводит к увеличению поглощения в зоне около 1599 нм. Поглощение в зоне 819 нм почти не изменяется, в зависимости от содержания воды</p>	Rock и др., 1986 Hunt Jr. и др., 1989 Ceccato P. и др., 2001
Нормализованный разностный инфракрасный индекс (Normalized Difference Infrared Index, NDII)	$NDII = \left(\frac{\rho_{0.819} - \rho_{1.649}}{\rho_{0.819} + \rho_{1.649}} \right)$ <p>Индекс может принимать значения от -1 до 1. Для зеленой растительности обычно принимает значения от 0.02 до 0.6</p>	Hardisky M.A. и др., 1983 Jackson T.L. и др., 2004

**Материал подготовил А.С. Черепанов,
старший инженер направления тематической обработки ДЗЗ компании «Совзонд»,
кандидат географических наук**