

Подспутниковый MODIS-ориентированный анализ информативности вегетационных индексов в задаче описания состояния яровой пшеницы Северного Казахстана

А.Г. Терехов, А.М. Кауазов

*Институт космических исследований ЦАФИ МОН,
ул. Шевченко, 15, Алматы, 050010, КАЗАХСТАН
E-mail: aterekhov1@yandex.ru*

Спутниковые данные MODIS (каналы 1: 620-670 нм; 2: 841-876 нм) с разрешением 250 м могут использоваться для оценки состояния зерновых культур в рамках статистических моделей. Подспутниковое обследование тестовых полей позволяет накапливать информацию необходимую для определения эмпирической зависимости связывающей спектральные характеристики полей с их ожидаемой урожайностью. Как правило, спектральные характеристики трансформируются к одному из вегетационных индексов. Тестирование ряда вегетационных индексов на данные по потенциальной биологической урожайности тестовых полей яровой пшеницы в Северном Казахстане показало наличие существенной зависимости прогнозной урожайности от выбранного вида вегетационного индекса. В связи с этим особенно актуальны наземные обследования зерновых полей для уточнения оптимальных видов вегетационных индексов, обеспечивающих лучшее соответствие между спектральными характеристиками пшеницы и ее состоянием. Наилучшие результаты в рамках наземных спектрометрических обследований были получены с Relation Vegetation Index (RVI), Difference Vegetation Index (DVI) и Weighted Difference Vegetation Index (WDVI).

Введение

10 миллионов гектар в Северном Казахстане используются для выращивания яровых зерновых культур. Крупный размер полей (400 га) делает возможным использование спутниковой информации среднего разрешения для контроля над спектральными характеристиками зерновых культур. Спутниковые данные EOS MODIS (спутники Terra и Aqua, канал 1 [620-670 нм] и 2 [841-876 нм], разрешение 250 м) ежедневно несколько раз покрывают всю территорию Северного Казахстана и являются удобным источником информации о состоянии посевов зерновых культур. Типичное зерновое поле (400 га) представляется на снимке MODIS в виде матрицы пикселей размером 8x8, что позволяет достоверно судить о его средних спектральных характеристиках. Прогноз валового сбора зерна может основываться на эмпирических уравнениях в рамках статистического подхода: спутниковых вегетационных индексах и ежегодном синхронном наземном обследовании зерновых полей в период колошения - цветения (конец июля – начало августа). В этот период объем зеленой биомассы и соответственно ее проективное покрытие достигает своего максимума, а существующая тесная взаимосвязь между объемом зеленой биомассы и продуктивностью зерновых культур может составлять основу для прогноза урожайности.

Подспутниковые наблюдения играют важную роль в спутниковой оценке состояния растительного покрова. Ежегодные маршрутные обследования позволяют корректировать на погодные особенности года взаимосвязь между состоянием культуры и спектральными характеристиками полей.

Спутниковые вегетационные индексы

Спутниковые вегетационные индексы представляют собой различные математические комбинации коэффициентов отражения подстилающей поверхности в двух спектральных диапазонах: красном и ближнем инфракрасном. По способу вычисления, существующие вегетационные индексы можно условно разделить на два класса: 1. Линейные комбинации яркостей спектральных каналов с коэффициентами, полученными на основе полевых измерений, - перпендикулярные индексы, например PVI, WDVI, DVI и т.д. 2. Индексы - отношения яркостей спектральных каналов, например, RVI, NDVI, SAVI и т.д.

Вегетационный индекс

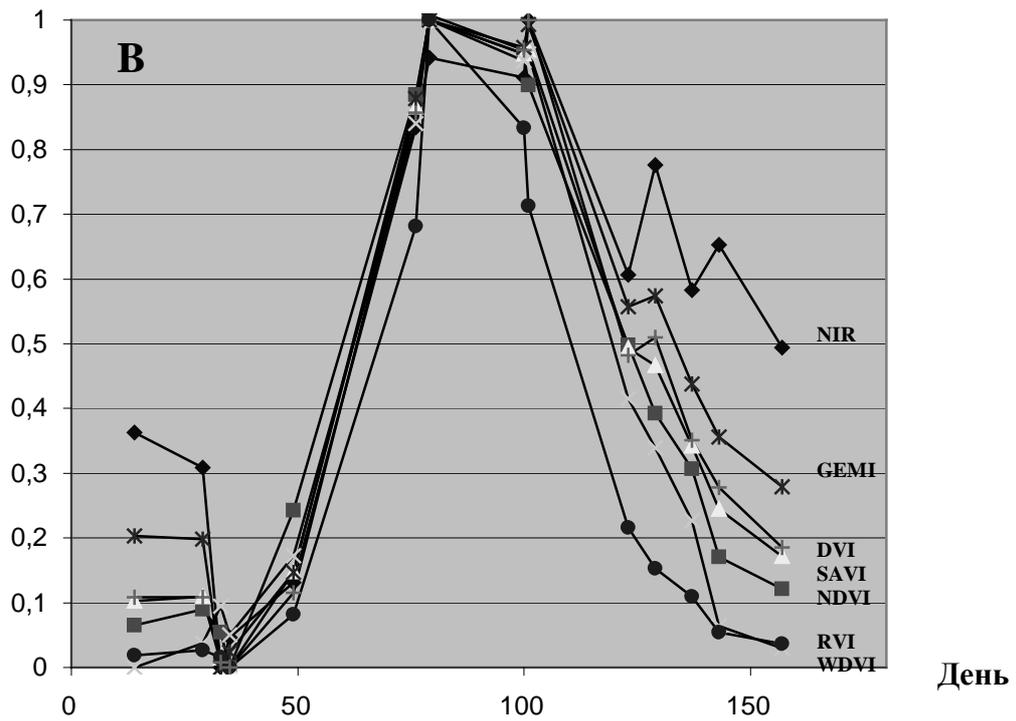
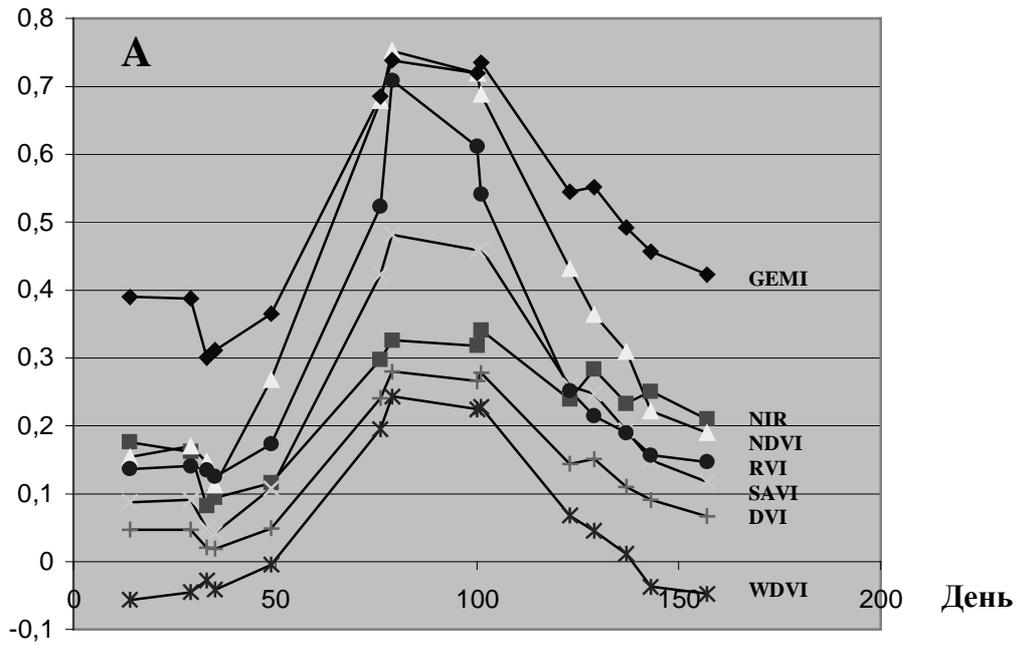


Рис.1. Динамика вегетационного цикла 2002 года пшеничного поля Акмолинской области расположенного в зоне южных черноземов: А - в представлении различных вегетационных индексов; В- значения всех индексов приведены к относительным единицам: 0 – минимум; 1 – максимум в сезоне. За начало отсчета в обоих случаях принято 1 мая

В системе EOS MODIS это канал 1 [620-670нм] и 2 [841-876 нм]. Хлорофилл, находящийся в зеленых частях растений, хорошо поглощает излучение красного цвета и отражает ближнее инфракрасное. Эта особенность служит основой оценки параметров растительного покрова.

В Северном Казахстане из-за недостатка увлажнения растительность в той или иной степени всегда испытывает стресс и практически никогда не образует 100 % листового покрытия на зерновых полях. Поэтому, почва также всегда участвует в формировании отраженного сигнала.

Различные виды растительности имеют разную пространственную организацию листьев и стеблей над почвой. От плотной системы игольчатых листовых пластин ориентированных вдоль направления на солнце, до широких и плоских листьев ориентированных перпендикулярно солнечному излучению. Кроме того, вариации по высоте между отдельными растениями или их частями формируют систему светотеней, которая также влияет на параметры отраженного от растительности солнечного света регистрируемого на спутнике.

Различные виды вегетационных индексов по-разному оценивают растительный покров, рис.1. Одни индексы оптимизированы для оценки смешанного почвенно-растительного сигнала, другие для полного листового покрытия и т.д. В любом случае цель использования растительного индекса – создание корректной системы линейного взвешивания: величина индекса – параметры растительности. Под параметрами растительности обычно понимают, либо объем зеленой растительной биомассы, либо долю проективного листового покрытия почвы, либо продуктивность.

Основные виды растительных индексов и формулы их расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1. Формулы расчета некоторых вегетационных индексов

Ratio Vegetation Index	$RVI = NIR/Red$
Normalized Difference VI	$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$
Infrared Percentage VI	$IPVI = NIR / (NIR + Red)$
Difference VI	$DVI = NIR - Red$
Perpendicular VI	$PVI = \sin(Y) * NIR - \cos(Y) * Red$ Где Y- угол между почвенной линией и осью NIR
Weighted Difference VI	$WDVI = NIR - C * RED$, где $C = NIR / RED$ для почвы.
Soil Adjusted VI	$SAVI = (1 + L) * (NIR - RED) / (NIR + RED + L)$, Где L- [0;1] 0 – наибольшее проективное покрытие; 1- наименьшее.
Global Environmental Monitoring Index	$GEMI = v * (1 - 0.25 * v) - (RED - 0.125) / (1 - RED)$; Где $v = [2 * (NIR^2 - RED^2) + 1.5 * NIR + 0.5 * RED] / (NIR + RED + 0.5)$.

Принципиальная схема прогноза урожайности зерновых на основе спутниковых данных

Основой прогноза урожайности зерновых культур месячной заблаговременности может быть статистическая, линейно-регрессионная модель (эмпирической уравнение). Обычно оно связыва-

ет спектральные характеристики (вегетационный индекс) зерновых полей в фазе колошения-цветения с их ожидаемой продуктивностью, оцениваемой при наземном обследовании.

Существует целый ряд факторов влияющих на урожайность зерновых культур в Северном Казахстане. Основные из них (в порядке значимости): погодные условия (температурно-влажностный режим), засоренность, содержание в почве усвояемого азота, весенний запас продуктивной влаги в почве, параметры сева (число семян на квадратный метр, их качество, глубина высева), содержание в почве полезных минеральных компонентов (за исключением азота), интенсивность давления вредителей и болезней. База наземных данных, накопленная в результате наземного обследования текущего года, включает оценку потенциальной биологической продуктивности тестовых полей. Первоначально из всего объема наземной информации отбираются поля, однородные по факторам, определившим их потенциальную урожайность. Причем основным фактором должен быть наиболее значимый – т.е. погодные условия. Это достигается отбором полей - первых культур после пара, не засоренных, с оптимальным сроком сева. Именно их состояние используется для калибровки спутниковых данных на потенциальную урожайность. И таким образом, на базе наземных и спутниковых данных формируется механизм взвешивания погодных условий текущего года, в смысле формирования потенциального урожая зерновых культур.

Выбор вегетационного индекса

В линейно-регрессионной модели прогноза урожайности могут использоваться любые типы вегетационных индексов или даже коэффициенты отражения в исходных каналах (RED, NIR). На основе наземных обследований зерновых полей в фазе колошения-цветения и спутниковых данных MODIS в сезоне 2005 года был протестирован ряд вегетационных индексов: DVI, WDV, PVI, RVI, IPVI, NDVI, SAVI, GEMI, и значения красного (RED) и ближнего инфракрасного (NIR) каналов. Рассчитаны корреляции (R^2) между величинами вегетационных индексов и ожидаемой урожайностью тестовых полей (рис.2), а также с помощью соответствующего уравнения регрессии рассчитана формальная средняя урожайность тестовых полей, табл.2.

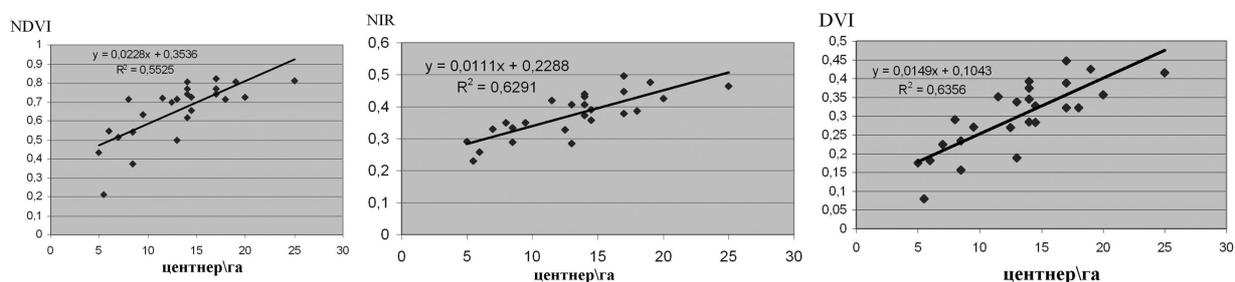


Рис.2. Калибровочные кривые: вегетационный индекс – потенциальная биологическая продуктивность тестовых полей; для некоторых вегетационных индексов в сезоне 2005 года. Вегетационные индексы построены на основе данных MODIS за 19 июля 2005 (продукт MOD02)

Таблица 2. Характеристики линейно-регрессионных взаимосвязей между потенциальной биологической продуктивностью тестовых полей и их различными вегетационными индексами, рассчитанными на базе MODIS за 19 июля 2005 года (канал 1,2). Под прогнозной урожайностью понималась формальная средняя урожайность тестовых полей, рассчитанная с помощью соответствующего линейно-регрессионного уравнения

№	Тип вегетационного индекса	R ²	Прогнозная урожайность (Центнер / гектар)
1	DVI	0.6356	9.52
2	NIR	0.6291	8.94
3	WDVI	0.6290	9.77
4	PVI	0.6290	12.42
5	GEMI	0.6229	9.96
6	SAVI	0.6149	10.05
7	RVI	0.5987	8.60
8	IPVI	0.5525	10.81
9	NDVI	0.5525	10.81
10	RED	0.4742	11.49

Наземное спектрометрическое обследования полей

Посев пшеницы в Северном Казахстане проводится в виде параллельных рядков, с расстоянием, обычно, 1-2 см между растениями и 23 см между рядами. Каждое поле имеет свои особенности, влияющие на его спектральный образ: величина проективного покрытия, ориентация рядков к солнцу (почва между рядами, либо в тени, либо на солнце), степень засоренности и тип сорной растительности, распределение растений по высотам и т.д.

При стандартном наземном описании состояния пшеницы используется множество различных параметров, связанных между собой: долю листового проективного покрытия (диапазон изменений от 0 до 1,0); число продуктивных стеблей на квадратном метре (от 80 до 450); среднюю высоту растений (25-110 см); полную площадь листового покрытия [Leaf Area Index] (0,1-3,5); средний размер колоса и число колосков в нем (5-11 пар), потенциальную биологическую урожайность (6-50 ц/га) и др.

При построении калибровочной кривой: [наземные параметры пшеницы] – [вегетационный индекс], на основе спутниковых данных из-за индивидуальных особенностей полей зависимость не имеет четкого характера, а величины корреляции (R²) относительно невелики: 0.6-0.8. В этих условиях оценка информативности, того или иного типа вегетационного индекса затруднена присутствием значимых случайных факторов. Между тем, величина прогнозной урожайности при прочих равных условиях существенно зависит от типа использованного вегетационного индекса.

Наземный спектрометр CROPSCAN имеет набор каналов в красной и ближней инфракрасной частях спектра, которые по длинам волн близки к параметрам 1,2 канала сканера MODIS. В сезоне 2006 года с помощью этого прибора были изучены спектральные образы пшеницы в максимально сопоставимых условиях. Было выбрано одно неоднородное, не засоренное поле, отличающееся только по состоянию культуры: плотности продуктивных стеблей (50-300) на квадратный метр, средней высоте растений, размеру колоса и т.д. Фактически полученные коэффициенты отражения в двух каналах от тестовых участков площадью по 1 квадратному метру, отличающих-

ся состоянием культуры служили основой для построения ряда зависимостей между параметрами культуры и величинами вегетационных индексов различных типов.

Различные типы вегетационных индексов ранжировались по лучшей коррелированности (R^2) в рамках линейной аппроксимации между параметрами культуры и величинами индексов следующим образом:

с плотностью продуктивных стеблей;	с биологической урожайностью
WDVI – 0,9935	RVI - 0,9836
DVI – 0,9915	DVI – 0,9494
SAVI - 0,9832	WDVI – 0,9474
RVI - 0,9758	SAVI – 0,9188
IPVI - 0,9437	NIR – 0,9092
NDVI -0,9437	IPVI - 0,8491
NIR -0,9402	NDVI – 0,8491

Таким образом, наилучшие наземные результаты в оценке состояния пшеницы дают: Relation Vegetation Index (RVI), Difference Vegetation Index (DVI) и Weighted Difference Vegetation Index (WDVI).

Выводы

Сопоставление наземных и спутниковых результатов использования различных типов вегетационных индексов в линейно-регрессионных уравнениях прогноза урожайности яровых зерновых культур Северного Казахстана дает схожие результаты. Вегетационные индексы DVI и WDVI в обоих тестах показывают одни из лучших результатов по критерию величины коэффициента корреляции. Величины прогнозной урожайности у них также близки – 9,52 ц\га (DVI) и 9,77 ц\га (WDVI). В спутниковой оценке можно отметить хороший результат, который имеют собственные значения канала NIR, как в величине коэффициента корреляции, так и в прогнозной урожайности (8.94 ц\га).