

# Основные элементы продуктивности яровой пшеницы Северного Казахстана сезона 2007 г. в представлении EOS MODIS

А.Г. Терехов

*Институт космических исследований  
ул. Шевченко, 15, Алматы, 050010, Казахстан  
E-mail: [aterekhov1@yandex.ru](mailto:aterekhov1@yandex.ru)*

Определена взаимосвязь между спектральными характеристиками (вегетационный индекс MODIS/WDVI) зерновых полей Северного Казахстана в период максимума зеленой биомассы и наземными параметрами основных элементов продуктивности пшеницы (плотность продуктивных стеблей, размер колоса и его озерненность) в сезоне 2007 года. Показано, что выраженная связь имела только с плотностью продуктивных стеблей ( $R^2=0.653$ ). Размер колоса  $R^2=0.003$  и его озерненность  $R^2=0.220$  слабо связаны со

$$A_{0.6} = A_{\text{атм.0.6}} + (A_{\text{блик.0.6}} + A_{\text{подст.пов.0.6}}) * \exp^2(-\tau_{0.6}^{k\lambda}), \quad (1)$$

$$A_{0.8} = F_{0.8} * A_{\text{атм.0.6}} + (A_{\text{блик.0.6}} + A_{\text{подст.пов.0.8}}) * \exp^2(-\tau_{0.6}^{k\lambda}), \quad (2)$$

$$A_{3.7} = F_{3.7} * A_{\text{атм.0.6}} + A_{\text{блик.0.6}} * \exp^2(-\tau_{0.6}^{k\lambda}), \quad (3)$$

Северный Казахстан – основной зерносеющий регион республики [1]. Свыше 12 млн. гектар посевных площадей отводятся под яровые зерновые культуры, которые являются региональной монокультурой. Посевы располагаются в различных климатических условиях: от сухих степей, до умеренно-увлажненной лесостепи, рис. 1. Различия в климатических условиях и финансовом состоянии хозяйствующих субъектов приводят к существенным вариациям в сельскохозяйственной практике возделывания пшеницы и ячменя.

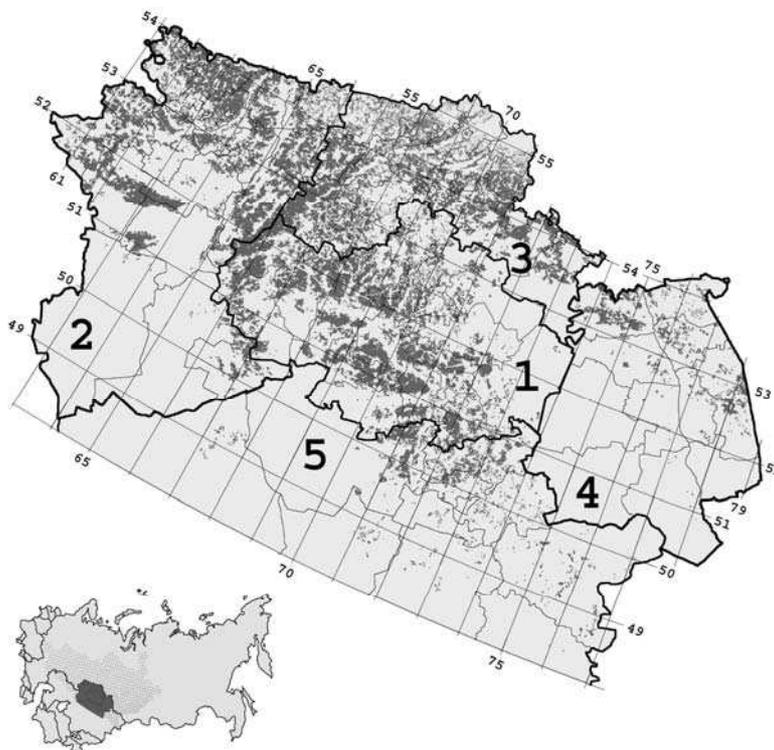


Рис. 1. Маска яровых культур Северного Казахстана, построено по данным EOS MODIS.

1. Акмолинская область; 2. Костанайская область; 3. Северо-Казахстанская область;  
4. Павлодарская область; 5. Карагандинская область

Сев яровых зерновых культур в Северном Казахстане начинается в первой половине мая и заканчивается к началу июня. Плотность культуры варьируется от 120 растений на квадратный метр (засушливые территории), до 450 (хорошая влагообеспеченность); высота растений от 25 до 110 см; размер колоса от 4 до 11 пар колосков, рис.2; озерненность от 2 до 4 зерен в колоске, рис. 2; засоренность посевов от 0 до 200 сорных растений на квадратный метр. Дороговизна удобрений и средств химической защиты культуры делает их применение эпизодическим и несистемным. Севооборот базируется на зернопаровой схеме, что приводит к закономерной цикличности в уровне засоренности и содержании азота в почве, определяемой номером культуры после пара. Короткие севообороты (3 и 4-польные) весьма популярные в регионе создают выраженную мозаичность в состоянии полей зерновых культур. Хорошие и плохие поля могут располагаться рядом, демонстрируя, что технология возделывания в условиях рискованного земледелия играет значительную роль в состоянии зерновых культур.



Число пар колосков в колосе  
вариабельность: 4 -12



Число зерен в колоске  
вариабельность: 2-4

Рис. 2. Параметры пшеничного колоса, определяющие продуктивность культуры

Все эти особенности приводят к большому разнообразию видов кривых вегетационной динамики [2], которые через вегетационные индексы могут оцениваться по спутниковым данным. Весьма удобными для целей мониторинга и оценки являются данные EOS MODIS (канал 1: 620-670 нм; канал 2: 841-876 нм, разрешение 250 м) ежедневно обеспечивающие полное покрытие всей территории Казахстана. Типичное поле размером 400 га по данным MODIS представляется в виде матрицы 8x8 пикселей, что позволяет оперировать средними для поля спектральными характеристиками. В качестве параметра оценивающего состояние зерновых культур в данной работе использовался вегетационный индекс WDV (Weighted Difference Vegetation Index [3]), который хорошо подходит для этих условий [4].

Примерно 150 тысяч полей яровых зерновых культур Северного Казахстана имеют условия произрастания культуры, различающиеся по основным факторам – режиму увлажнения и содержания питательных веществ в почве.

Спутниковый прогноз урожайности зерновых культур Северного Казахстана встречает определенные трудности. Детальное описание состояния культуры основанное на спутниковом мони-

торинге ее развития в случае регионального масштаба становится слишком громоздким. Разные даты сева, сортовая скороспелость зерновых (раннеспелые, среднеспелые или поздние) и климатические условия в различных частях региона десинхронизируют фазы развития культуры на отдельных полях. Определенным выходом может быть использование в качестве характерной величины спутниковую оценку максимума зеленой биомассы. Период максимума объема зеленой биомассы длится около 3 недель, что позволяет полям различных дат сева и темпов созревания культуры более или менее выровняться.

Оценка потенциальной урожайности зерновых культур на основании сезонного максимума величины вегетационного индекса наблюдающегося в фазе колошения-цветения сопряжена с рядом неопределенностей. Прохождение более ранних ключевых фаз развития зерновых культур в неблагоприятных условиях приводит к формированию мелкого колоса (уменьшенное количество пар колосков в колосе) и соответственно уменьшению урожайности, рис. 3. При этом объем зеленой биомассы к фазе цветения также может иметь высокие значения. Озерненность колоса, т.е. число формирующихся зерен в колоске, определяется благоприятностью температурно-влажностных условий в период формирования колоса. Не благоприятность погодных условий в этот период, в первую очередь, сказывается на формировании колоса, листовое покрытие более устойчиво к неблагоприятным условиям и страдает в меньшей степени.

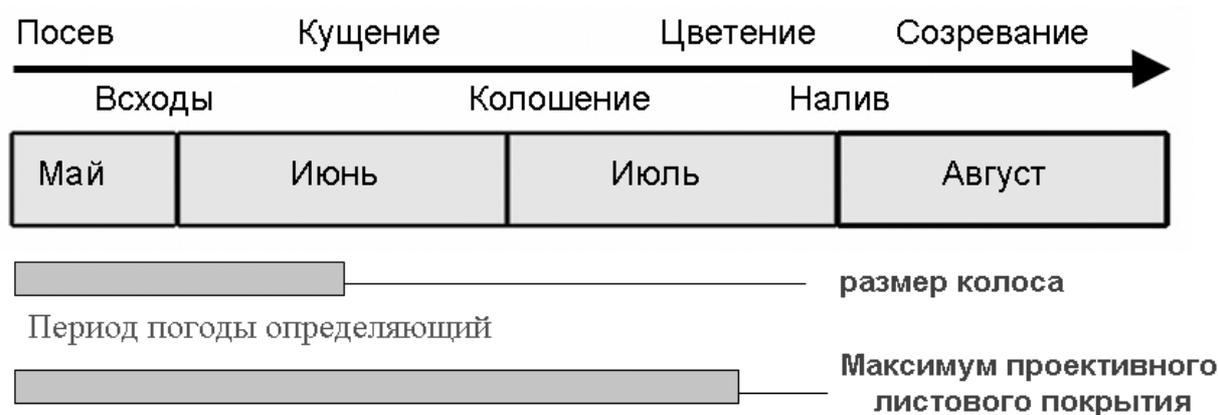


Рис. 3. Временная схема типичного вегетационного цикла яровой пшеницы в Северном Казахстане

В Северном Казахстане явления засухливости, так или иначе, проявляются каждый год. Многообразие почвенно-климатических условий и их сочетание с погодными условиями вегетационного сезона текущего года каждый год продуцируют примерно одинаковый диапазон фактической урожайности яровых зерновых культур на отдельных полях: от 3-4 до 30-40 ц/га.

Модельные расчеты в рамках физиологических схем всегда конкретны [5]. Исходная информация – это точно определенные величины различных параметров, влияющих на развитие культуры, из которых погодные компоненты обычно требуются с суточной периодичностью.

Применимость таких моделей для прогноза урожайности в масштабе крупных регионов, имеющих значительные вариации климатических условий, ограничена. Необходимо иметь большой объем исходной информации для проведения расчетов для каждого поля, либо переходить к системе эталонных полей, учитывающих основное многообразие имеющихся условий в регионе. В последнем случае появляется необходимость в дополнительной сложной процедуре взвешивания доли каждого из эталонов для получения корректных интегральных оценок региональной урожайности.

Спутниковые оценки могут оперировать средними спектральными характеристиками и эмпирическими зависимостями для прогноза урожайности, что значительно проще. Однако остается проблема взаимосвязи между основными элементами продуктивности пшеницы и спектральными характеристиками культуры в период максимума зеленой биомассы. Изучение этого момента в погодных условиях 2007 года являлось целью этой работы.

## Спутниковые данные

В качестве спутниковых информации привлекались данные EOS MODIS (канал 1: 620-670 нм; канал 2: 841-876 нм, разрешение 250 м). Использовался безоблачный снимок, датированный 30 июля 2007 года в формате MOD02 (reflectance). Расчет вегетационного индекса WdVI велся по формуле:

$$WdVI = Band\ 2 - K (Band\ 1),$$

где K – отношение (Band 2/Band 1) для чистой почвы; принимался равным 1,5.

## Наземная информация

Территория мониторинга включала Костанайскую область Северного Казахстана, рис. 1. В области в настоящее время имеется около 5 млн. гектар пахотных земель используемых в основном под яровыми зерновыми культурами (пшеница, ячмень).

Наземная информация о состоянии зерновых культур собиралась путем маршрутного обследования полей Костанайской области в течение 15-30 июля 2007 года. В рамках экспедиции было описано около 500 полей, что служило исходной базой данных.

Для получения однородных данных обследовались только пшеничные поля. Описание культуры включало регистрацию: плотности продуктивных стеблей на квадратном метре; среднюю высоту растений; длину и размер колоса; его озерненность (для фазы молочной спелости) и некоторые другие параметры.

Методика обследования базировалась на описании одной площадки на поле. Полученная характеристика культуры соотносилась к средним спектральным параметрам (MODIS/WdVI) всего поля. Такой подход обеспечивает приемлемую точность [6] для полей расположенных в степном ландшафте Северного Казахстана.

## Обсуждение полученных результатов

Погодные условия 2007 года для яровых зерновых культур Костанайской области, в общем, были весьма благоприятны, что отразилось в рекордной величине собранного урожая (свыше 5 млн. тонн зерна). Среди неблагоприятных факторов можно отметить 7-10 дневный жаркий период в конце июня. На фоне низкой влажности воздуха дневная температура доходила до 35°C и выше. Температура выше 30°C с влажностью воздуха менее 40 % является стрессовым фактором для пшеницы, которая даже при достаточном почвенном увлажнении не способна переносить такие условия без ущерба для своего состояния [1].

Для проведения анализа из имеющейся базы данных отбирались максимально однородные поля, отличающиеся только анализируемому параметру. Как правило, это были 1 или 2 культуры после пара под наиболее распространенной яровой, мягкой, безостой пшеницей в фазе цветения с уровнем засоренности посевов менее 10%.

Плотность продуктивных стеблей параметр наиболее близко связанный с объемом зеленой биомассы и величиной проективного листового покрытия. На большей части диапазона возможных состояний пшеницы в фазе колошения-цветения увеличение плотности продуктивных стеблей сопровождается увеличением листового покрытия и высоты растений.

Экспериментальная зависимость между WdVI и плотностью продуктивных стеблей для не засоренных пшеничных полей Костанайской области в сезоне 2007 года представлена на рисунке 4. Достаточно высокое значение коэффициента корреляции ( $R^2=0.653$ ) в рамках линейно-регрессионной модели указывает на наличие хорошей взаимосвязи между спектральными характеристиками полей и плотностью продуктивных стеблей, что может служить основой для дистанционных методов оценки состояния культуры и ее ожидаемой урожайности.

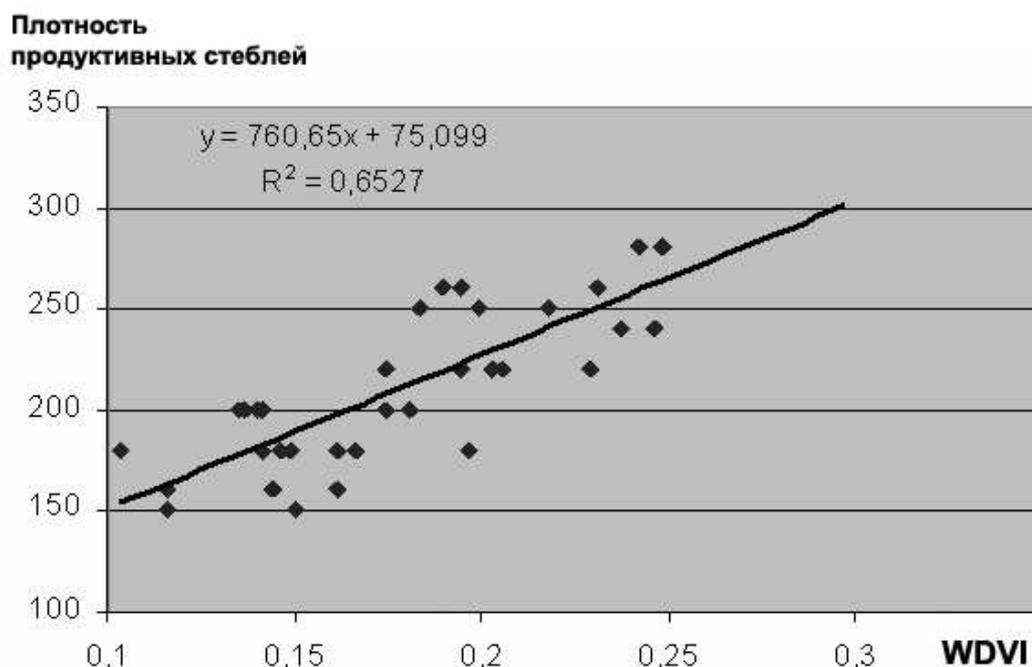


Рис. 4. Взаимосвязь между плотностью продуктивных стеблей и величиной вегетационного индекса MODIS/WDVI для тестовых полей Костанайской области в фазе цветения в сезоне 2007 г.

Для анализа взаимосвязи между размером колоса (числом пар колосков) и спектральными характеристиками культуры было отобрано 27 полей. Следует отметить, что погодные условия 2007 года привели к повсеместному уменьшению размера колоса у пшеницы. Наблюдалось ограниченное число полей с крупным колосом, которые были расположены в основном в северных частях Костанайской области. Кривая зависимости величины колоса от величины вегетационного индекса представлена на рисунке 5.

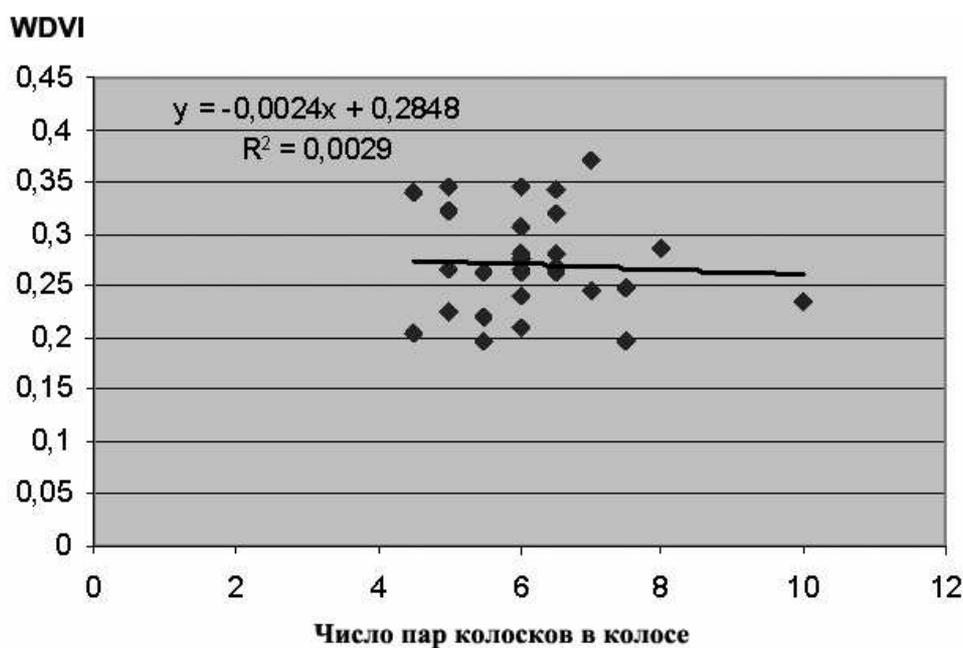


Рис. 5. Взаимосвязь между размером колоса и средней величиной MODIS/WDVI для тестовых полей Костанайской области в сезоне 2007 г.

Величина коэффициента корреляции близкая к нулю (0.03) говорит, что жаркий период конца июня повлиял только на размер колоса, не затронув плотность посевов. Хорошее состояние листового покрытия на фазу цветения (время наземного обследования) было сформировано погодными условиями предшествующих двух недель, которые по параметру увлажнения были весьма благоприятными.

Оценка взаимосвязи спектральных характеристик зерновой культуры и озерненности колоса оказалась наиболее сложной задачей. Полное формирование зерен в колосе происходит после цветения, поэтому в имеющейся базе данных было весьма ограниченное число полей (13) с информацией по количеству зерен в колоске. Дополнительной сложностью было то что, из-за малого объема исходной информации, оказалось, невозможно обеспечить однородность выборки по фактору засоренности и сортовым характеристикам. Все это привело к упрощенной процедуре анализа. Анализировалась взаимосвязь между озерненностью колоса и плотностью продуктивных стеблей, рис. 6. Последний фактор имеет хорошо выраженную взаимосвязь с величиной спутникового вегетационного индекса и поэтому может служить в качестве корректного диагностического параметра.

Число полей  
с озерненностью колоска  
в 3 зерна

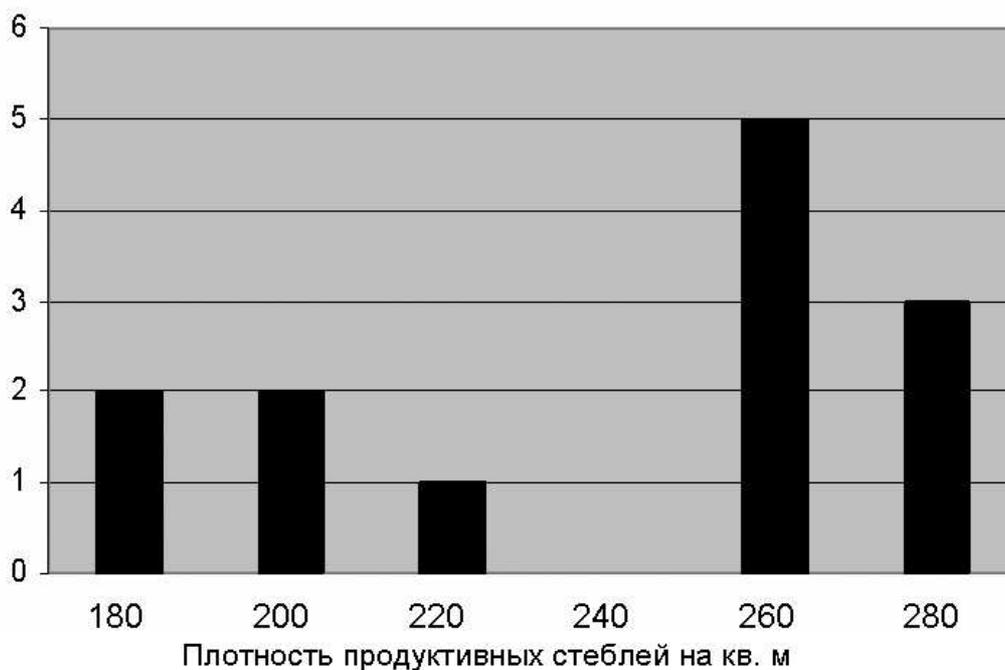


Рис. 6. Плотность продуктивных стеблей на полях с известной озерненностью колоса. Тестовые поля Костанайской области в сезоне 2007 г.

Результаты анализа показали, что в сезоне 2007 года высокая озерненность колоса (3 зерна в колоске) не имела ярко выраженной связи с плотностью продуктивных стеблей. Коэффициент корреляции между средней озерненностью колоса на поле и плотностью продуктивных стеблей имел величину 0.22.

### Выводы

Таким образом, в погодном сценарии 2007 года средний по полю спутниковый вегетационный индекс MODIS/WDVI на конец июля (колошение – цветение) имел выраженную взаимосвязь

только с одним элементом продуктивности яровой пшеницы – плотностью продуктивных стеблей ( $R^2=0.653$ ). При ее полном отсутствии связи с размером колоса ( $R^2=0.003$ ) и слабовыраженной связью с его озерненностью ( $R^2=0.220$ ). В этих условиях наземная информация является незаменимой составляющей, определяющей точность спутниковых оценок урожайности зерновых культур Северного Казахстана.

### Литература

1. *Бараев А.И.* Яровая пшеница в Северном Казахстане // Алма-Ата, «Кайнар», 1975. 232 с.
2. *Doraiswamy P., Sinclair T., Stern A., Akhmedov B., Muratova N.* Evaluation of MODIS Data for Assessment of Regional Spring Wheat Yield in Kazakhstan // 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium and 24<sup>th</sup> Canadian Symposium on Remote Sensing Proceeding, Toronto, Canada, 24-28 June, vol. I, pp 487-490.
3. *Clevers J.G.P.W.* The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index // Remote Sens. Environ. 1988. Vol.25. P.53-69.
4. *Терехов А.Г., Кауазов А.М.* Подспутниковый MODIS-ориентированный анализ информативности вегетационных индексов в задаче описания состояния яровой пшеницы Северного Казахстана // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. Сб. научн. статей. Вып. 4. Т. II. М.: ООО «Азбука-2000», 2007. С.352-357.
5. *Day W., R.K. Atkin* (editors), Wheat Growth and Modelling. Plenum Press, 1985, New York, 269 p.
6. *Терехов А.Г.* Методы анализа и диагностики данных дистанционного зондирования на примере задачи прогноза объема зернового производства Северного Казахстана \ \ Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ин-т математики МОН Республики Казахстан, Алматы, 2007. 151 с.