

# **Эмпирические зависимости между элементами продуктивности яровой пшеницы Северного Казахстана и спектральными характеристиками полей по данным EOS MODIS в сезонах 2005-2009**

**А.Г. Терехов**

*Институт космических исследований,  
Национальное космическое агентство, Республика Казахстан  
050010, КАЗАХСТАН, Алматы, ул. Шевченко, 15  
E-mail: aterekhov1@yandex.ru*

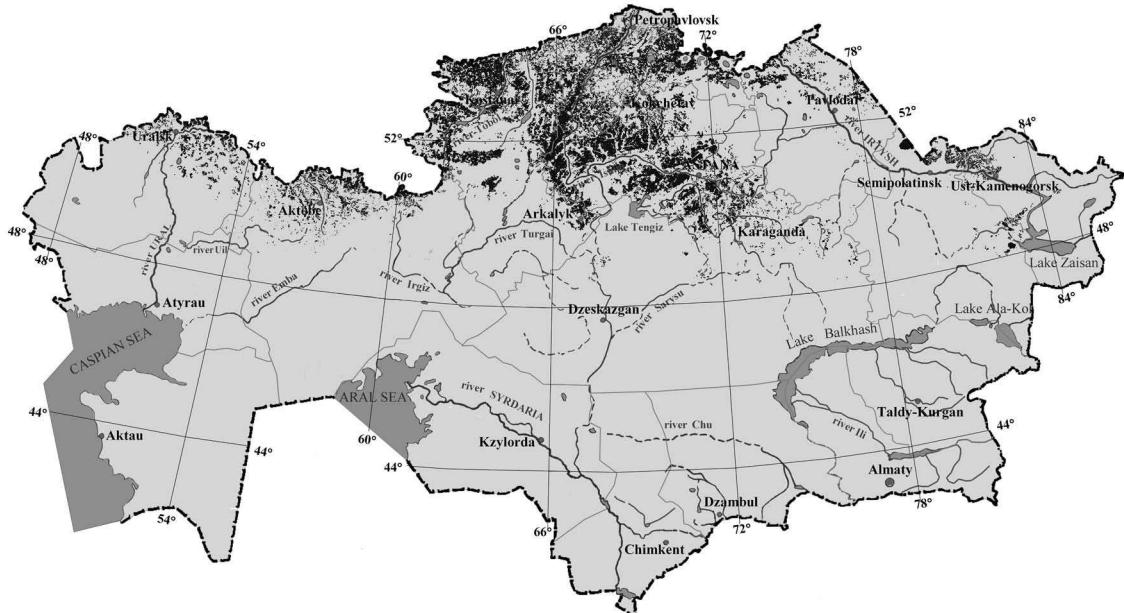
Проанализированы эмпирические зависимости между величинами спутникового вегетационного индекса WDVI (Weighted Difference Vegetation Index), регистрируемого в период цветения культуры, и основными элементами продуктивности яровой пшеницы Северного Казахстана. Установлено, что число продуктивных стеблей на квадратном метре характеризуется наиболее выраженной взаимосвязью с величинами WDVI. Размер колоса и его озерненность не имеют четких зависимостей с WDVI пшеничных полей в фазу цветения. Однако, по данным 2005-2009 гг. на масштабе отдельных областей наиболее значимые для прогноза урожайности зерновых соотношения между величинами WDVI пшеничных полей в период цветения и ожидаемой урожайностью имеют относительно близкие эмпирические линейно-регрессионные уравнения. Таким образом, в задаче спутникового прогноза урожайности зерновых культур Северного Казахстана месячной заблаговременности на базе эмпирических зависимостей объем ежегодно необходимой наземной информации может быть существенно сокращен или даже заменен продуктами обработки метеорологических данных.

**Ключевые слова:** вегетационный индекс, прогноз урожайности зерновых культур, эмпирические зависимости, элементы продуктивности яровой пшеницы.

## **Введение**

В Северном Казахстане под выращивание яровых зерновых культур (пшеница и ячмень) используется свыше 14 миллионов гектар пахотных земель. Средний размер поля составляет около 400 га, что позволяет использовать спутниковые данные EOS MODIS (разрешение 250 м) для ежедневного мониторинга спектральных характеристик на масштабе отдельных полей [1,2]. Наличие такой детальной информационной основы о спектральных изменениях культуры позволяет контролировать различные параметры зернового производства, например размер посевных площадей [3,4], засоренность посевов [5], элементы продуктивности яровой пшеницы [6].

Прогноз урожайности яровых зерновых культур представляет наибольший практический интерес. Анализ состояния посевных площадей крупных сельскохозяйственных регионов несет в себе дополнительные трудности. Проблема прогноза урожайности культуры на базе спектральных характеристик усугубляется наличием ряда зашумляющих факторов: разница в датах сева, использование различных сортов культур, погодно-индукционными вариациями состояния посевов внутри крупных регионов и пр. Целью работы являлась оценка вариабельности в период 2005-2009 годов эмпирических зависимостей оценки продуктивности полей пшеницы Северного Казахстана от величин спутникового вегетационного индекса.



*Рис. 1. Посевные площади яровых зерновых культур в Северном Казахстане*

### **Основные характеристики посевов яровых зерновых культур в Северном Казахстане**

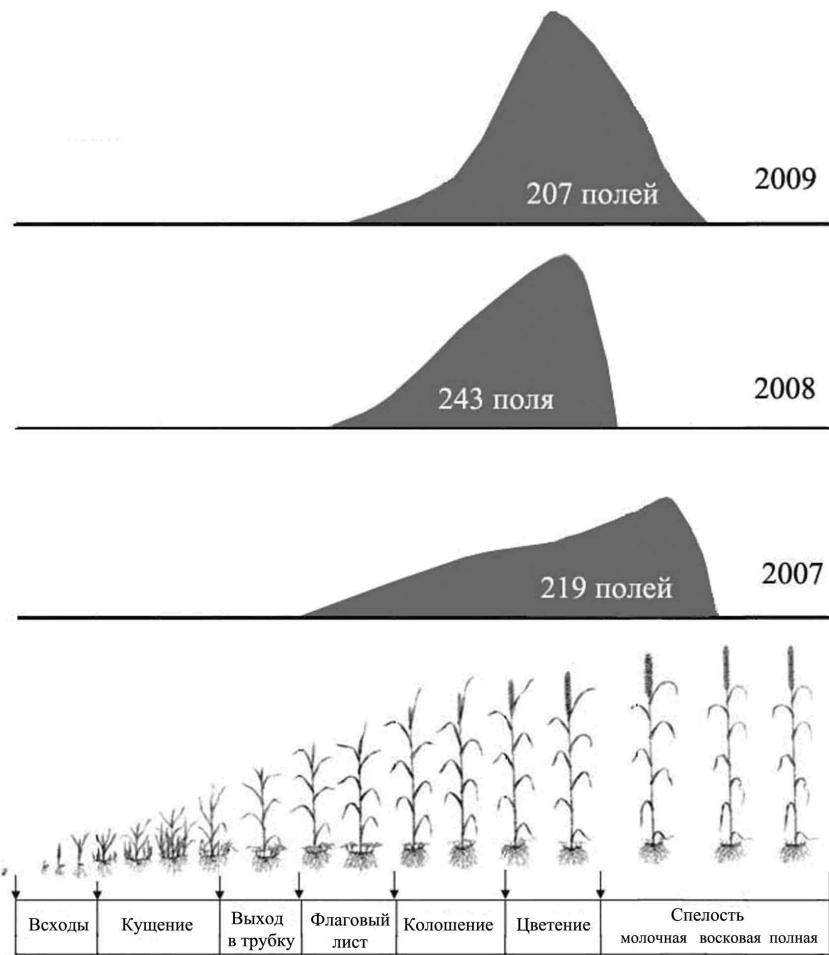
Зерновое производство в степной зоне Северного Казахстана (рис.1) является основой сельского хозяйства. Монокультурное выращивание яровых зерновых культур на крупных полях, расположенных компактными массивами, создает максимально благоприятные условия для использования спутниковых данных в задачах контроля над параметрами сельскохозяйственного производства.

Ежегодно, в период массового цветения культуры (конец июля), проводится наземное маршрутное обследование пшеничных полей. Обследование необходимо для накопления фактической информации о состоянии культуры, используемой при построении эмпирических зависимостей [величина спутникового вегетационного индекса - ожидаемая урожайностью пшеницы].

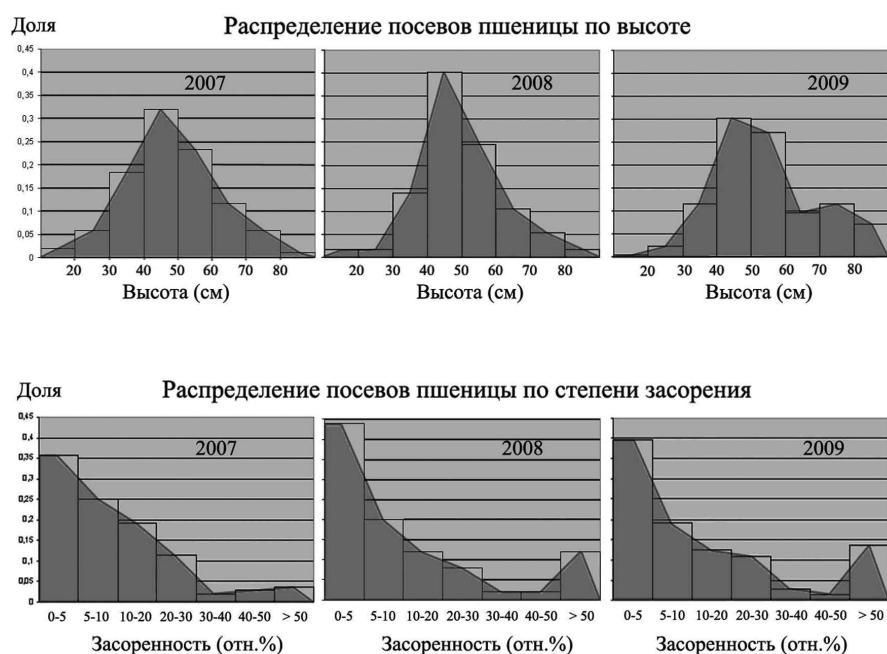
Наземное маршрутное экспресс обследование включает стандартное агрономическое описание культуры на нескольких сотнях полей. Вариабельность основных характеристик зерновых культур Северного Казахстана представляет интерес для понимания степени влияния погодных особенностей вегетационного сезона. На рис. 2 и 3 приведен ряд характеристик посевов яровой пшеницы Северного Казахстана.

### **Элементы продуктивности яровой пшеницы**

Яровая пшеница – одна из наиболее распространенных сельскохозяйственных зерновых культур Северного Казахстана. В условиях климатического недостатка увлажнения на боргере выращиваются различные сорта, которые имеют достаточно близкие структурные характеристики. Наиболее типичная сельскохозяйственная практика включает: рядковый посев, с расстояниями между растениями в рядке 1-2 см, между рядками 15-25 см; с периодом массового сева от 15 мая до 5 июня и уборкой в сентябре-октябре.

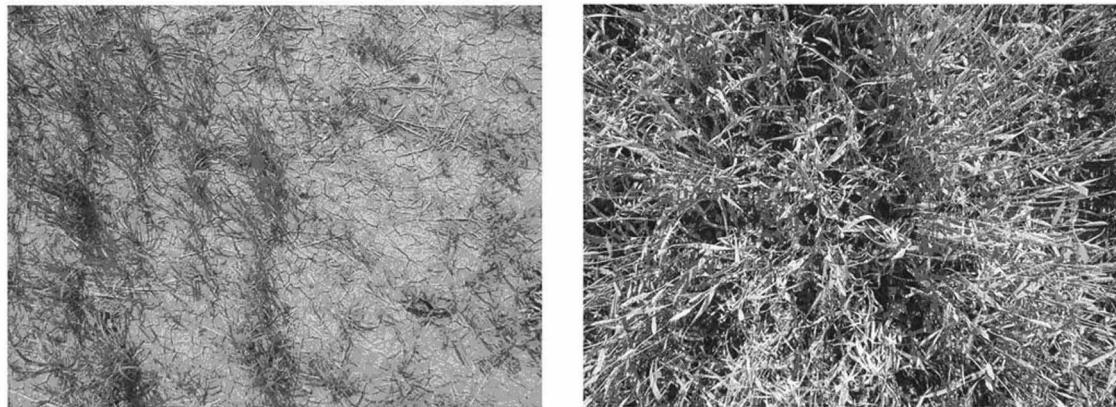


*Рис. 2. Распределение посевов пшеницы Северного Казахстана по фазам развития на момент наземного обследования полей (20-30 июля)*



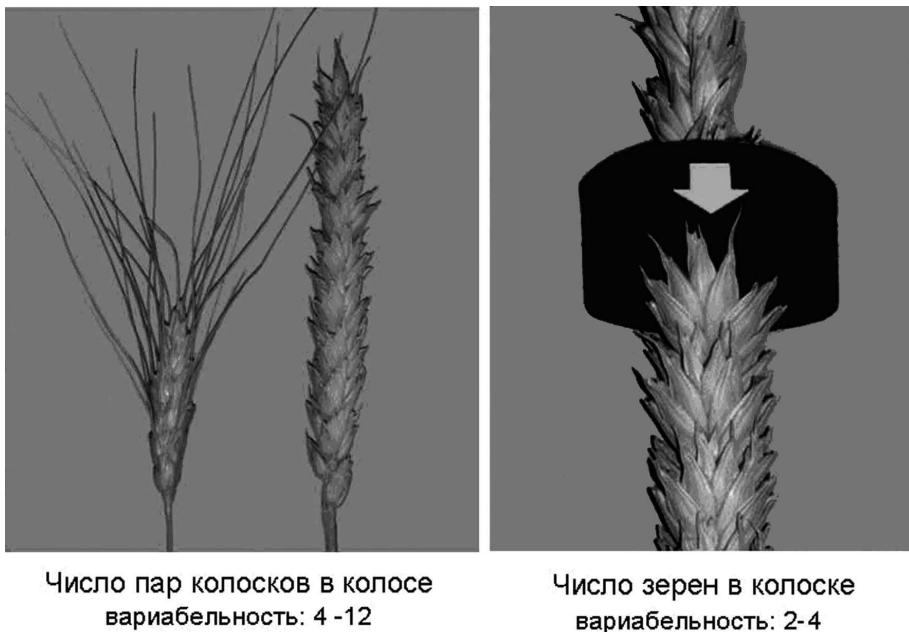
*Рис. 3. Некоторые характеристики посевов яровой пшеницы Северного Казахстана на момент наземного обследования полей (20-30 июля)*

Вариации норм высея и условий увлажненности первой половины вегетационного периода продуцируют различную плотность культуры, которая описывается через число продуктивных стеблей на квадратном метре (150 - 400 растений), рис. 4.



*Рис. 4. Вариации плотности продуктивных стеблей пшеницы на полях Северного Казахстана (фаза цветения)*

Характеристики колоса – размер (число колосков), озерненность колоска; определяют число зерен в колосе, рис. 5. Таким образом, параметры колоса совместно с плотностью продуктивных стеблей формируют продуктивность культуры.



*Рис. 5. Структурные характеристики колоса пшеницы Северного Казахстана*

### **Спутниковые данные**

Сканер MODIS, размещенный на спутниках (Terra, Aqua) системы EOS, ежедневно осуществляет полное сканирование поверхности Земли в 38 спектральных каналах. Два канала (1 и 2) с разрешением 250 м в красной (620-670 нм) и ближней инфракрасной (841-876 нм) частях спектра специально предназначены для оценки состояния растительности.

В настоящий момент разработано большое количество различных видов спутниковых вегетационных индексов, расчет которых основан на математических комбинациях величин коэффициентов отражения в красном и ближнем инфракрасном каналах. Разнообразие видов вегетационных индексов обусловлено наличием широкого спектра задач при описании растительного покрова, состояния и условия, произрастания которого подвержено большим вариациям.

Проективное покрытие яровых зерновых культур Северного Казахстана характеризуются относительно невысокой долей листового покрытия. Для количественного описания таких объектов один из лучших результатов [7] имеет индекс WDVI (Weighted Difference Vegetation Index) рассчитываемый по формуле [8]:

$$WDVI = NIR - K * RED$$

где, NIR – коэффициент отражения в ближнем инфракрасном канале;

RED – коэффициент отражения в красном канале;

K – коэффициент, определяемый отношением NIR/RED для открытой почвы.

Вегетационный индекс WDVI разработан таким образом, что значению равному нулю соответствует отсутствие зеленой биомассы. Коэффициент (K) для чистого почвенного покрова существенным образом зависит от содержания гумуса. В условиях Северного Казахстана величина (K) варьируется, примерно от 1.0 (черноземы) до 1.5 (каштановые почвы) [9]. Сельскохозяйственная практика последних лет направлена на аккумуляцию на полях растительных остатков. Поэтому, на зерновых полях типично становится структура подстилающей поверхности, в которой чистый почвенный покров все больше замещается на почву покрытую слоем морт-массы. Величина (K) для морт-массы имеет величину около (1.7), рисунок 6.

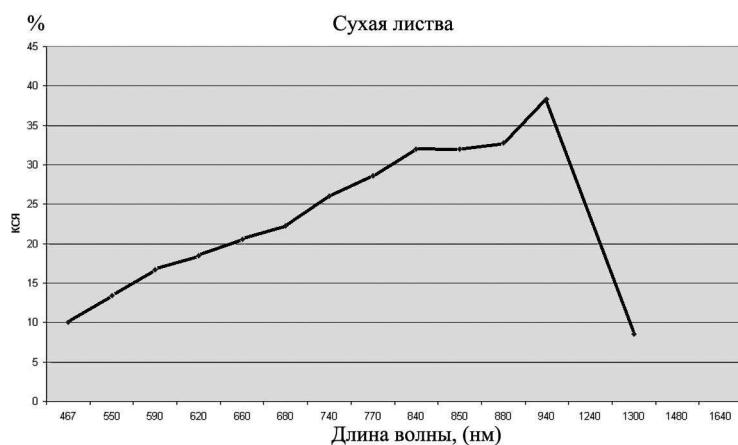


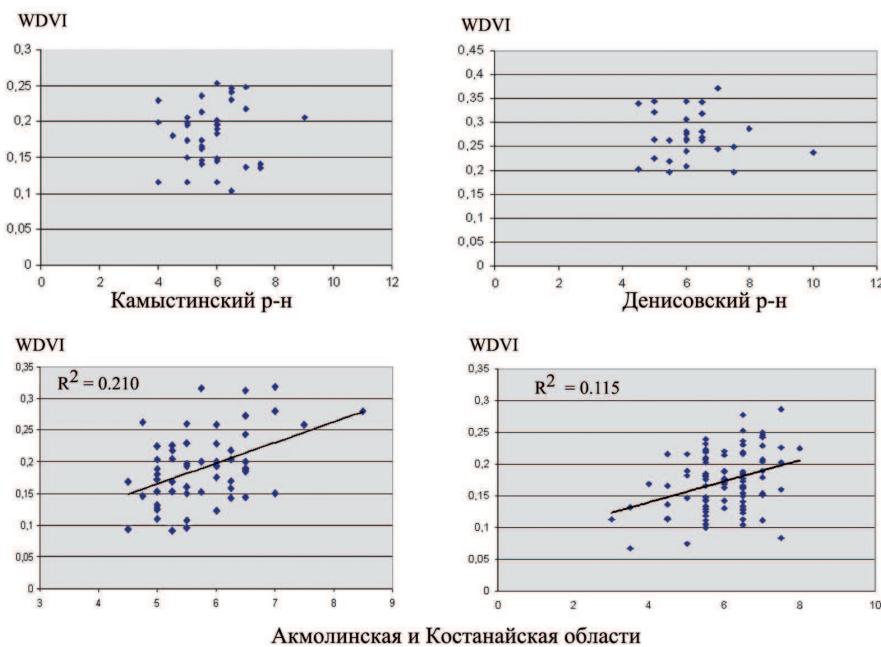
Рис. 6. Пример спектральных характеристик морт-массы

В Северном Казахстане под зерновыми культурами превалируют темно-каштановые почвы. С учетом имеющейся практики разбрасывания растительных остатков на зерновых полях в расчетах величин WDVI значение коэффициента (K) принималось равное 1,5.

Снимки MODIS, получаемые на собственной станции приема, обрабатывались до формата MOD 02 [reflectance]. Оптимальным временем залета спутника являлось время массового цветения яровых зерновых культур, для Северного Казахстана это 10-30 июля. В течение этого периода искался наиболее безоблачный снимок, который использовался в качестве основы. Технология формирования мозаичных покрытий не применялась. В обработке сезонов 2005-2009 гг. участвовали снимки датированные: 3 июля 2005, 25 июля 2006, 30 июля 2007, 8 июля 2008, 22 июля 2009. Помехи облачного покрова не позволили в 2005 и 2008 году найти спутниковые снимки нужного периода, поэтому привлекались изображения, по датам съемки максимально приближенные к искомым.

### **Взаимосвязь элементов продуктивности пшеницы с величинами спутникового вегетационного индекса**

Параметры колоса – его размер и озерненность колосков – формируются в соответствующие критические периоды развития культуры. Недостаток влаги в фазе кущения уменьшает размер колоса и озерненность главного колоса [10]. Последующие осадки могут восстановить зеленую биомассу растений к фазе цветения, но часть урожая будет уже потеряна. Поэтому, состояние листового покрытия в фазу цветения, регистрируемое спутником через вегетационные индексы, строго говоря, может не иметь прямой связи с параметрами колоса, рис. 7.



*Рис. 7. Зависимости размера колоса (число пар колосков) от величины вегетационного индекса WDVI для обследованных полей Северного Казахстана*

Плотность продуктивных стеблей пшеницы более тесно связана с величиной вегетационного индекса на момент цветения, рисунок 8. Возможные вариации обусловлены разной силой растений. При недостатке увлажнения формируются низкорослые, слабые растения, которые, тем не менее, имеют колос и формально относятся к озерненным стеблям, а их плотность, закладываемая нормой высева, может быть относительно высока.

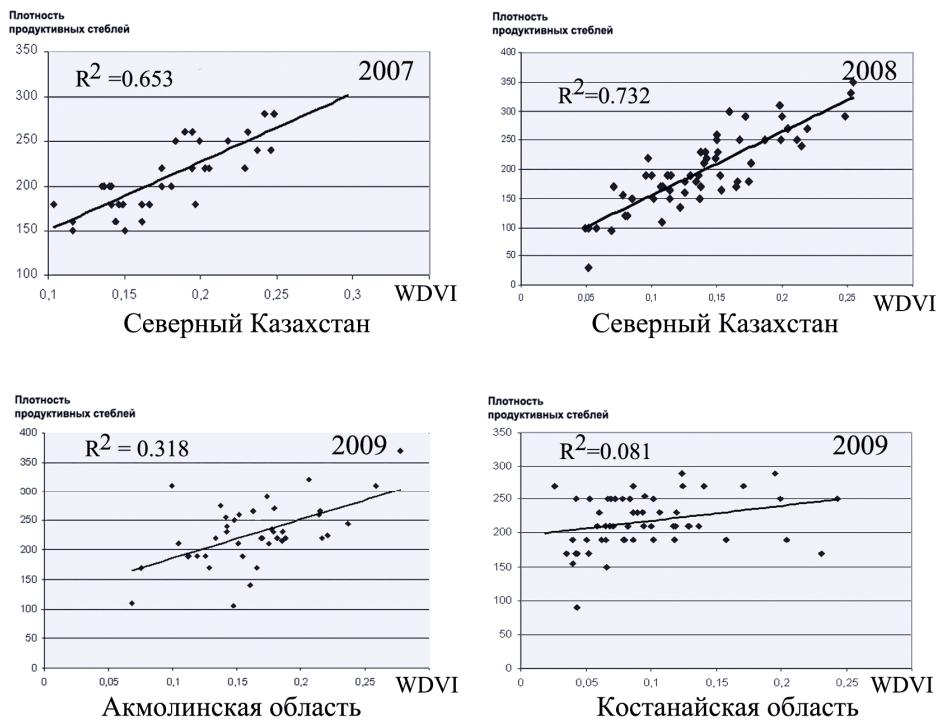


Рис. 8. Примеры зависимостей величины вегетационного индекса WDVVI от плотности продуктивных стеблей пшеничных полей в момент наземного обследования (фаза цветения)

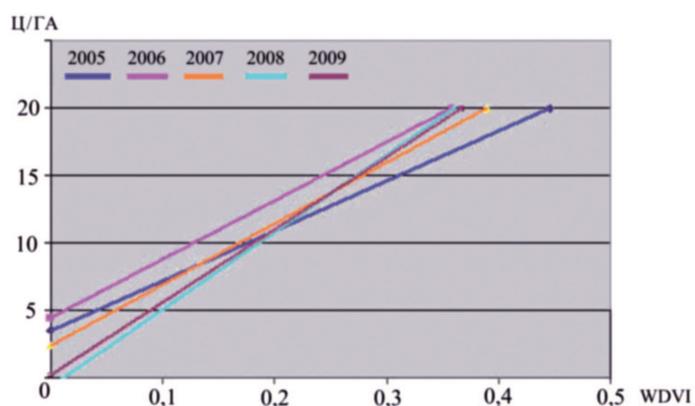


Рис. 9. Эмпирические линейно-регрессионные уравнения зависимостей между величинами вегетационного индекса WDVVI для пшеничных полей Северного Казахстана и их ожидаемой урожайностью в сезонах 2005-2009 годов

### Эмпирические зависимости прогнозной урожайности

При наземном описании культуры ожидаемая урожайность рассчитывается по данным о плотности культуры, размере колоса (число колосков), озерненности колоска в соответствии с уравнением:

$$[\text{Урож.}] = \text{Ко} * [\text{плотн. культуры}] * [\text{размер колоса}] * [\text{озерненность}] * [\text{вес зерна}]$$

Вес зерен берется в пределах 30-35 г, в зависимости от ожидаемых погодных условий на фазу налива. Коэффициент (Ко) отвечает за переход от биологической урожайности

к фактической, т.е. таким образом, происходит учет машинных потерь при уборке зерна и неточностей при формальном агрономическом описании состояния культуры. На рисунке 9 приведены эмпирические зависимости ожидаемой урожайности от величин индексе WDV1 для Северного Казахстана в сезонах 2005-2009 годов.

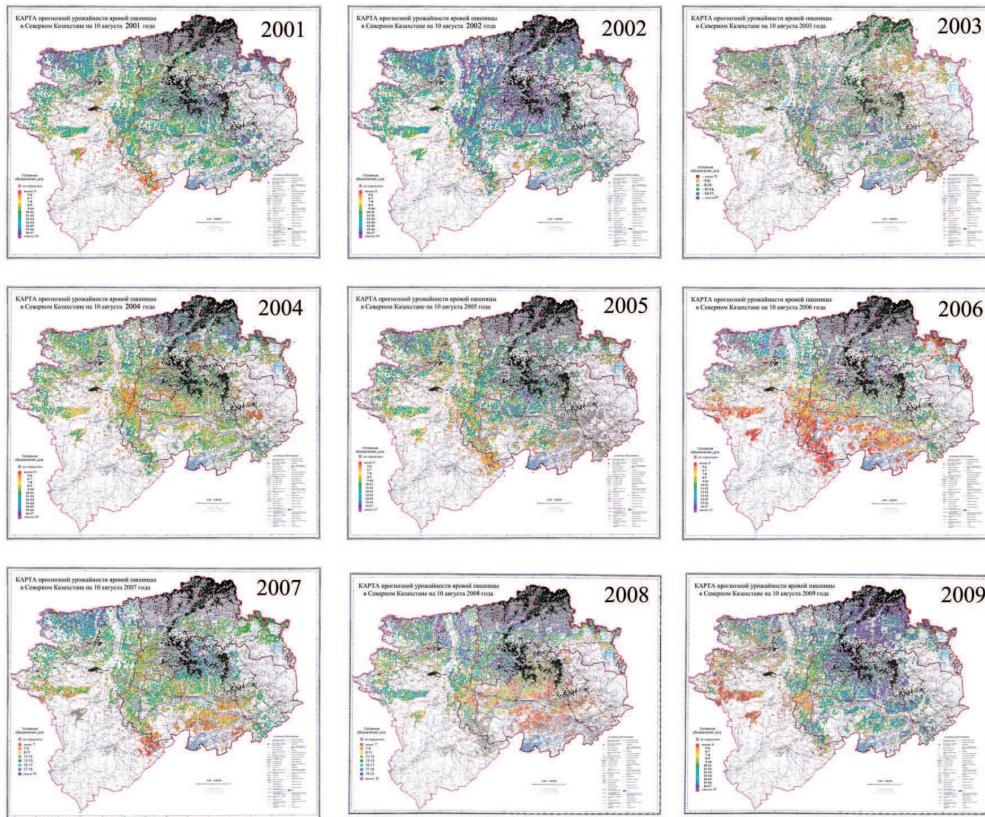


Рис. 10. Карты прогнозной урожайности яровой пшеницы месячной заблаговременности построенные на базе эмпирических зависимостей между WDV1 и ожидаемой урожайностью культуры на фазу цветения по данным MODIS

## Заключение

Финальные соотношения между WDV1 пшеничных полей и ожидаемой урожайностью после учета всех факторов, связанных с элементами продуктивности пшеницы для крупных сельскохозяйственных областей (3-4 млн. га посевов), имели относительно близкие эмпирические линейно-регрессионные уравнения:

$$\begin{aligned} \text{Prod} &= 37.1 * \text{WDVI} + 3.5 \quad [2005]; \quad R^2 = 0,63 ; \\ \text{Prod} &= 43.6 * \text{WDVI} + 4.4 \quad [2006]; \quad R^2 = 0,92 ; \\ \text{Prod} &= 45.2 * \text{WDVI} + 2.4 \quad [2007]; \quad R^2 = 0,70 ; \\ \text{Prod} &= 57.2 * \text{WDVI} - 0.6 \quad [2008]; \quad R^2 = 0,80 ; \\ \text{Prod} &= 54.0 * \text{WDVI} + 0.2 \quad [2009]; \quad R^2 = 0,52 . \end{aligned}$$

Это позволяет определить универсальное уравнение:

$$\text{PROD [ц/га]} = 49.36 * \text{WDVI} + 1.97$$

При сохранении основных факторов, формировавших урожайность зерновых Северного Казахстана в 2005-2009 гг., использование этого уравнения не требует уточнения через наземное обследование.

Таким образом, в задаче прогноза урожайности крупных регионов Северного Казахстана на базе эмпирических зависимостей при использовании универсального уравнения объем ежегодно необходимой наземной информации может быть существенно сокращен или даже заменен продуктами обработки метеорологических данных. На рисунке 10 представлены карты прогнозной урожайности по данным MODIS 2001-2009 гг.

## Литература

1. *U. Sultangazin, N. Muratova, A. Terekhov.* Monitoring and assessment of spring crops in Kazakhstan // Agro-meteorological Monitoring in Russia and Central Asian Countries. Eds. Savin I., Negre T. EUR 22210. 2006. P. 85-104.
2. Султангазин У.М., Муратова Н.Р., Терехов А.Г. Использование космического мониторинга для планирования и прогнозирования зернового производства // Труды первой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса», Москва. С. 279-285.
3. Терехов А.Г., Юсупова А.С., Зинченко Е.А., Муратова Н.Р. Оперативная инвентаризация размеров яровых посевов Северного Казахстана на базе спутниковых данных MODIS и IRS LISS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Москва: ООО «Азбука-2000», 2007, Вып.4, Т. II. С.365 – 371.
4. Терехов А.Г. Оценка точности спутниковой технологии определения площади сельскохозяйственных масок в схеме с использованием снимков различного разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Москва: ООО «Азбука-2000», 2009. Вып.6, Т. II. С.358 – 363.
5. *U. Sultangazin, N. Muratova, A. Terekhov, P. Doraiswamy* Monitoring Crop Rotation and Weed Infestation Estimation using MODIS // Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Anchorage, Alaska. 2004. P. 4066-4069.
6. Терехов А.Г. Основные элементы продуктивности яровой пшеницы Северного Казахстана сезона 2007 года в представлении EOS MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Москва: ООО «Азбука-2000». 2007, Вып.4, Т. II, С.364 – 370.
7. Терехов А.Г., Каузов А.М. Подспутниковый MODIS-ориентированный анализ информативности вегетационных индексов в задаче описания состояния яровой пшеницы Северного Казахстана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Москва: ООО «Азбука-2000». 2007, Вып.4, Т. II, С.352 – 357.
8. 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.
9. Терехов А.Г., Каузов А.М. Методика оценки содержания гумуса в пахотных землях Северного Казахстана на основе спутниковых данных// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Москва: ООО «Азбука-2000». 2007, Вып.4, Т. II, С.358 – 364.
10. Бараев А.И. Яровая пшеница в Северном Казахстане // Алма-Ата: Кайнар, 1975. 232 с.

# **Empirical relations between the elements of the productivity of spring wheat of Northern Kazakhstan and spectral characteristics of the fields according to the EOS MODIS for season 2005-2009**

**A. Terekhov**

*Space Research Institute*

*Join-stock company National Centre of the Space Research and Technology*

*050010 Kazakhstan, Almaty, 15 Shevchenko*

*E-mails: aterekhov1@yandex.ru*

The empirical relationships between the value of satellite vegetation index of WDVI (Weighted Difference Vegetation Index) which recorded during the period of flowering of culture, and main elements of productivity of spring wheat in Northern Kazakhstan are analyzed. It is found that the number of productive stems per square meter is characterized by the expression of correlation with the values WDVI. The size of the ear and its grain content did not have a clear relationship with WDVI of wheat fields for the phase of flowering. However, the most important ratio for predicting the yield of grain between WDVI of wheat fields during the flowering period and the expected yields are relatively close to the empirical linear regression equations on the scale of individual regions according to 2005-2009. Thus, amount of annually necessary ground-based information can be substantially reduced or even replaced by results of processing of meteorological data for the problem of satellite month lead time forecast of grain yields in Northern Kazakhstan on the basis of empirical relations.

**Keywords:** vegetation index, the forecast of yield of cereals crops, empirical relations, the elements of productivity of spring wheat.