

Возможности использования спутниковых данных влажности почвы при анализе урожайности яровой пшеницы (на примере Саратовской области)

Е.А. Черенкова¹, А.А. Черенкова²

¹ *Институт географии РАН, Москва, Россия*

² *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

E-mail: lcherenkova@marketresearch.ru

По данным наблюдений за температурой воздуха и осадками на 8 метеостанциях Саратовской области и спутниковым данным влажности почвы построена модель множественной линейной регрессии урожайности яровой пшеницы в период 1992–2010 гг. от среднемесячных и декадных значений рассмотренных показателей, а также гидротермического коэффициента Селянинова и индекса суровости засухи Палмера. Показано, что введение в рассмотрение спутниковых данных влажности почвы улучшают воспроизведение моделью урожайности яровой пшеницы.

Ключевые слова: методы математической статистики, спутниковые данные влажности почвы (SWI), урожайность, яровая пшеница, Саратовская область.

Введение

Урожайность сельскохозяйственных культур определяется, прежде всего, агротехническим уровнем земледелия и почвенно-климатическими условиями района возделывания. Как известно, основные зернопроизводящие районы Российской Федерации находятся в зоне неустойчивого и недостаточного увлажнения. В этой связи анализ и прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур были и остаются весьма актуальными.

Отечественной наукой достигнуты значительные успехи в разработке теоретической базы и прикладного динамического моделирования урожайности. Результаты исследования долгопериодных колебаний урожайности сельскохозяйственных культур методами математической статистики применяются в агрометеорологических целях и в агростраховании. Такой анализ проводится в тесной связи с оценкой влияния на формирование урожая погодно-климатических факторов. При этом наибольшее распространение получили методы регрессионного и корреляционного анализа. Зависимости урожайности различных зерновых культур от гидрометеорологических факторов получены многими авторами (Уланова, Забелин, 1990; Kinger, Mattice, 1928; Lobell, Field, 2007; Mattice, 1931; Riley, 1957 и многие другие).

Появление архивов новых данных дистанционного зондирования (таких как, например, влажность почвы, вегетационные индексы, альбедо и температура поверхности), получаемых посредством спутникового мониторинга с конца XX в., открыло новые возможности применения таких данных для анализа и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур. Использование спутниковых данных имеет очевидное достоинство, заключающееся в широте охвата территории наблюдениями, частоте, однородности и высоком пространственном разрешении измерений. Но есть и недостатки,

которые ограничивают применение архивов: небольшой временной интервал наблюдения, проблематичность корректного сопоставления абсолютных значений спутниковых и наземных данных по причине несовпадения методов, единиц измерения и ограниченности территории наземных измерений. Известны попытки отечественных исследователей применить спутниковые данные вегетационного индекса NDVI, характеризующего состояние растительности, для прогнозирования урожайности (Клещенко и др., 2012).

Цель данной работы состоит в определении целесообразности использования спутниковых данных влажности почвы и возможности их комбинирования с наземными данными для анализа временных рядов урожайности. Это попытка ответить на вопрос, улучшается ли воспроизведение урожайности яровой пшеницы регрессионной моделью при введении в рассмотрение дистанционных данных почвенной влаги?

Материалы и методы

Исследование проведено для территории Саратовской области на основе данных наблюдений за температурой воздуха и суммами осадков на 8 метеостанциях метеорологической сети Росгидромета из архива суточных данных ВНИИГМИ-МЦД (<http://www.meteo.ru>) (рис. 1). Для оценки изменений влажности почв использовался архив значений Soil Water Index (спутникового индекса почвенной влаги SWI) Технологического Университета Вены (Австрия) (Naeimi et al., 2009). Архивные значения SWI получены на основе дистанционных материалов, содержащих информацию о коэффициентах обратного рассеяния радиометров, установленных на спутниках ERS-1 и ERS-2. SWI показывает содержание воды в процентах в почвенной толще глубиной до 1 м. Архивные данные имеют пространственное разрешение 12,5 x 12,5 км и представлены подекадными временными рядами за каждый месяц с 1992 по 2010 г. Из рассмотрения был изъят период 2001–2003 гг., когда измерения со спутника были временно прерваны по причинам технической неисправности. Значения влажности почвы рассчитывались для узлов сетки с координатами максимально близкими к каждой выбранной метеостанции путем осреднения значений в окружающих соседних узлах. Ранее была выявлена тесная корреляционная зависимость данных SWI с данными наземных наблюдений за влажностью почвы (Albergel et al., 2010; Crow et al., 2012). Возможности применения спутниковых данных почвенной влаги на территории суббореальных равнинных ландшафтов европейской части России были оценены ранее (Черенкова и др., 2010; Черенкова, 2011).

В работе использован статистический метод множественного регрессионного анализа, где в качестве зависимой переменной выступает урожайность конкретной сельскохозяйственной культуры, а независимыми переменными – показатели, полученные на основе метеорологических и спутниковых данных. Влияние трендовой составляющей урожайности на рассмотренном временном интервале полагалось несущественным. Уравнение линейной множественной регрессии для урожайности Y в общем виде записывается как $Y = C_1 X_1 + \dots + C_n X_n + \beta$, где C_i – i -й регрессионный коэффициент, X_i – i -й агрометеопоказатель, β – свободный коэффициент, n – число зависимых переменных-предикторов.

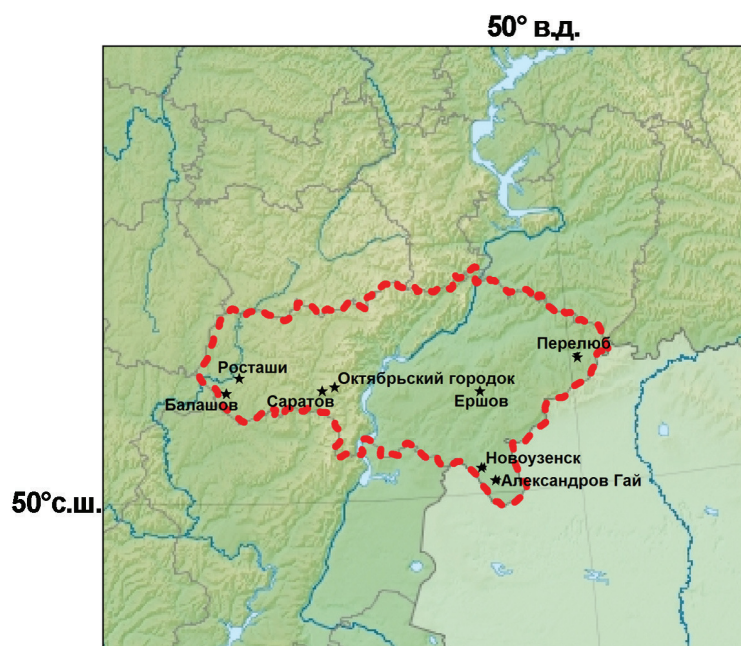


Рис. 1. Метеостанции Саратовской области

В качестве независимых переменных при построении регрессионных зависимостей были взяты среднемесячные и средние за декады температуры и суммы осадков, рассчитанные на основе суточных значений минимальной, средней и максимальной температуры воздуха и сумм осадков с мая по июль в период 1992–2010 гг. Кроме того, рассмотрены показатели, характеризующие соотношение тепла и влаги: среднемесячные значения гидротермического коэффициента Селянинова ГТК (Селянинов, 1928) и показателя условий влажности Palmer Drought Severity Index PDSI (Palmer, 1965). Значения ГТК вычисляются как отношение суммы осадков за период со средними суточными температурами воздуха выше 10 °С (мм) к сумме температур за тот же период, увеличенное в 10 раз. Показатель условий влажности PDSI характеризует дефицит влажности (в частности, засуху и переувлажнение различной интенсивности) и рассчитывается по рекурсивной формуле с использованием уравнения водного баланса в сокращенной форме.

В качестве спутниковых данных в модель были включены декадные данные спутникового индекса почвенной влаги SWI.

Вычисления проводились с помощью пакета статистических программ SPSS.

Обсуждение результатов

Чтобы добиться получения устойчивой модели, мы исключили избыточные переменные–предикторы, выполнив оценку их взаимной коррелированности. Кроме того, для увеличения корреляции зависимой и независимых переменных модели была произведена замена независимых переменных на деривативные показатели (в основном полиномами 2-го и 3-го порядка). В результате статистического анализа многомерной регрессии выведено уравнение зависимости урожайности яровой пшеницы в период 1992–2010 гг. с наибольшим значением коэффициента детерминации R^2 (0,86 без данных SWI и 0,88 с SWI)

при наименьшем количестве независимых переменных и со значением стандартной ошибки 1,6 и 1,5 соответственно.

При этом установлено, что в большей степени на рассмотренную урожайность влияет температура приземного воздуха и влажность почвы 2-й и 3-й декады мая, 1-й декады июня, а также соотношение тепла и влаги в мае (*табл. 1*). Увеличение R^2 при введении в рассмотрение спутниковых данных почвенной влажности вполне может являться основанием их использования при анализе урожайности. На *рис. 2* видно, что графики динамики урожайности лучше согласованы при использовании значений SWI (*рис. 2б*), чем без них (*рис. 2а*). Полученные результаты не противоречат результатам исследований прогностических зависимостей урожайности основных сельскохозяйственных культур от различных наземных измерений агрометеорологических параметров, показавшие, что определяющим фактором является запас продуктивной влаги в метровом слое почвы, который, в свою очередь, формируется в зависимости от выпавших осадков и регулируется температурой воздуха посредством испарения (Уланова, 1975).

Таблица 1. Зависимые переменные и коэффициенты уравнения множественной линейной регрессии для урожайности яровой пшеницы на территории Саратовской области в период 1992–2010 гг. Тип функциональной зависимости с урожайностью яровой пшеницы:

¹ – квадратичная, ² – кубическая, ³ – степенная, ⁴ – экспоненциальная

Переменная	Коэффициенты модели:	
	без SWI	с SWI
Константа	-71,33	-27,0
Средняя максимальная суточная температура воздуха в мае ¹	-1,1	-0,63
Средняя минимальная суточная температура воздуха в июне ⁴	-0,66	-0,54
ГТК в июле ²	-0,46	-0,4
ГТК с мая по июнь ²	0,35	0,3
Сумма средней суточной температуры воздуха с мая по июль ²	0,35	–
Средняя температура воздуха 1-й декады мая ¹	0,48	–
Средняя температура воздуха 1-й декады июня ²	0,95	0,74
Средняя температура воздуха 2-й декады мая ²	0,76	0,5
Средняя температура воздуха 2-й декады июня ⁴	-0,26	-0,51
Средняя температура воздуха 3-й декады мая ³	1,17	1,13
Средняя температура воздуха 3-й декады июля ²	0,31	0,56
Сумма осадков 1-й декады мая ²	0,45	0,54
Сумма осадков 2-й декады мая ²	0,35	0,33
Сумма осадков 2-й декады июля ²	0,65	0,59
Сумма осадков 3-й декады июля ²	0,24	0,24
Pdsi в мае ²	0,55	0,69
Pdsi в июле ²	0,47	0,39
Влажность почвы во 2-й декаде мая ³	–	0,41
Влажность почвы в 3-й декаде мая ³	–	-0,69
Влажность почвы в 1-й декаде июня ²	–	0,6

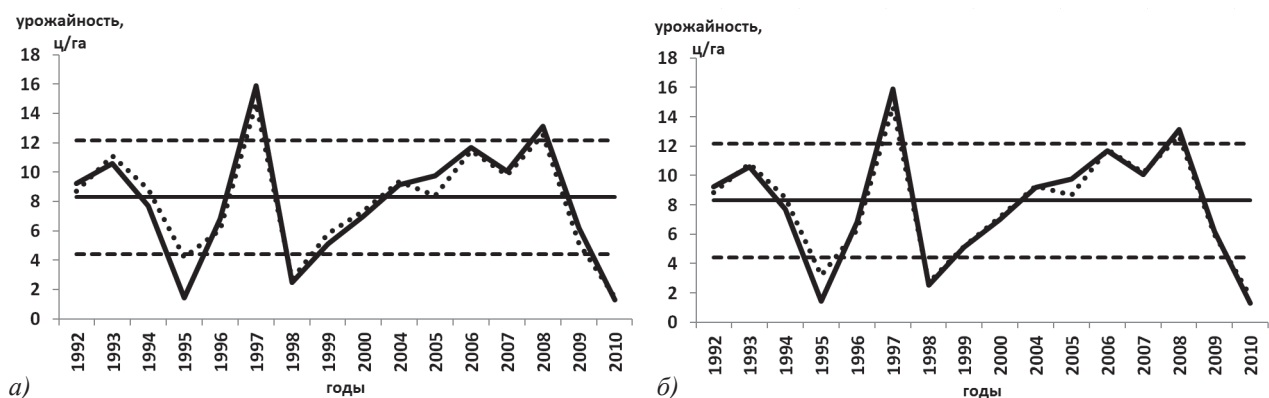


Рис. 2. Динамика среднеобластной (сплошная линия) и смоделированной (точечная линия) урожайности яровой пшеницы (ц/га) на территории Саратовской области в период 1992–2010 гг.: а) без SWI, б) с SWI. Прямой штриховой линией показан коридор среднеквадратического отклонения, прямой сплошной линией – среднее многолетнее значение урожайности яровой пшеницы в Саратовской области

При моделировании динамики урожайности наиболее важным является способность модели адекватно отражать экстремальные значения. На графике *рис. 2* хорошо видно, что локальные экстремумы рассматриваемых величин соотносятся достаточно близко. Поведение реальной и смоделированной урожайности наиболее тесно отображается в периоды 1996–2000 гг. и 2006–2010 гг. Однако необходимо отметить, что модель склонна несколько занижать недобор зерна в рассмотренный период. Смоделированные отрицательные экстремумы урожайности 1995, 1998, 2010 гг., значения которых вышли за рамки коридора среднеквадратического отклонения, не только хорошо согласуются с годами максимального недобора зерна по области, но и с годами наблюдения обширных сильных и экстремальных летних засух на территории Приволжского федерального округа РФ (Черенкова, 2013). Отметим, что летняя экстремальная засуха 2010 г. на территории европейской части России наиболее сильно проявилась именно в Приволжском округе и обусловила рекордное снижение урожая, в частности, в Саратовской области – до 1,29 ц/га.

Посмотрим, как построенная модель способна смоделировать беспрецедентно низкую с начала ведения официальной статистики с 1947 г. урожайность яровой пшеницы в 2010 г. на территории области. Для этого применим описанную выше процедуру к данным за период 1992–2009 гг. и рассчитаем по полученным регрессионным зависимостям значения урожайности яровой пшеницы в Саратовской области в 2010 г. В обоих случаях модель завышает прогнозируемый сбор зерна в 2010 г.: без данных со спутника точность прогноза снижения урожайности относительно среднего составила 3,9 ц/га, с SWI точность прогноза повысилась до 3,7 ц/га, что можно считать неплохим результатом, учитывая крайне экстремальный характер летних условий 2010 г. При этом включение в модель спутниковых данных влажности почвы на 15% улучшило областной прогноз урожайности.

Заключение

Накопление данных наблюдений различных агро- и метеопараметров посредством спутникового мониторинга поверхности Земли из космоса открывает новые перспективы применения таких данных, в частности, для анализа временных рядов урожайности. Новизна предложенного подхода состоит, прежде всего, в оценке возможности применения наиболее полного и надежного на текущий момент архива современных спутниковых данных почвенной влажности. Опираясь на полученные в исследовании результаты, можно считать оправданным применение спутниковых данных почвенной влажности для анализа урожайности яровой пшеницы. Предложенная методика будет также полезна при оценке рисков в агростраховании.

Литература

1. *Клещенко А.Д., Гончарова Т.А., Найдина Т.А.* Использование спутниковой информации в динамических моделях прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 4. С. 90–99.
2. *Селянинов Г.Т.* О сельскохозяйственной оценке климата // *Труды по сельскохозяйственной метеорологии*. 1928. Вып. 20. С. 165–177.
3. *Уланова Е.С., Забелин В.Н.* Методы корреляционного и регрессионного анализа в агрометеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 207 с.
4. *Уланова Е.С.* Агрометеорологические условия и урожайность озимой пшеницы. Л.: Гидрометеиздат, 1975, 302 с.
5. *Черенкова Е.А.* Количественные оценки атмосферных засух в Европейской России // *Изв. РАН. Серия географическая*, 2013. № 5 (в печати).
6. *Черенкова Е.А.* Аномалии увлажнения юга Европейской России по спутниковым и наземным данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011. Т. 8. № 1. С. 209–214.
7. *Черенкова Е.А., Золотокрылин А.Н., Новикова Н.М., Вышивкин А.А.* Аномалии влажности почвы на территории Северо-Западного Прикаспия по спутниковым данным в конце XX – начале XXI века // *Аридные экосистемы*. 2010. Т. 16. № 4. С. 53–61.
8. *Albergel C., Calvet J.-C., Rosnay P., Balsamo G., Wagner W., Hasenauer S., Naeimi V., Martin E., Bazile E., Bouyssel F., Mahfouf J.-F.* Cross-evaluation of modelled and remotely sensed surface soil moisture with in situ data in southwestern France // *Hydrol. and Earth Syst. Sci.* 2010, 14. P. 2177–2191.
9. *Cafiero C.* Perspectivas para las politicas de gestion de riesgos y crisis en la agricultura de la Union Europea // *Revista espanola de estudios agrosociales y pesqueros*. 2009. No. 221. P. 95–126.
10. *Crow W.T., Berg A.A., Cosh M.H., Loew A., Mohanty B.P., Panciera R., de Rosnay P., Ryu D., Walker J.P.* Upscaling sparse ground-based soil moisture observations for the validation of coarse-resolution satellite soil moisture products // *Rev. Geophys.* 2012. 50. RG2002. doi:10.1029/2011RG000372.

11. *Kinger J.B. and Mattice W.A.* Statistical Correlations of Weather Influence on Crop Yields // *Mon. Wea. Rev.* 1928. 56. P. 53–57.
12. *Lobell D.B., Field C.B.* Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming // *Environ. Res. Let.* 2007. V. 2. P. 1–7.
13. *Naeimi V., Bartalis Z., Wagner W.* ASCAT soil moisture: An assessment of the data quality and consistency with the ERS scatterometer heritage // *Journal of Hydrometeorology.* 2009. Vol. 10. Issue 2. P. 555–563.
14. *Mattice W.A.* Weather and corn yields // *Mon. Wea. Rev.* 1931. No. 59. P. 105–112.
15. *Palmer W.C.* Meteorological drought. U.S. Department of Commerce Research. Paper 45. 1965. 65 p.
16. *Riley J. A.* Soil temperatures as related to corn yield in Central Iowa // *Mon. Wea. Rev.* 1957. No. 85. P. 393–400.

The possibility of using of satellite soil moisture data in the analysis of spring wheat productivity (with an example from the Saratov region)

E.A. Cherenkova¹, A.A. Cherenkova²

¹Institute of Geography, RAS, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: lcherenkova@marketresearch.ru

Multiple linear regression model for spring wheat productivity was designed using observations of decade and monthly mean air temperature and precipitation at 8 meteorological stations of Saratov region and satellite data of soil moisture in the period 1992–2010. Also we used Selyaninov hydrothermal coefficient and Palmer Drought Severity Index. It is shown that the satellite soil moisture data improves model productivity of spring wheat.

Keywords: statistical methods, satellite data of soil moisture (SWI), productivity, spring wheat, Saratov region.