

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ И ЗЕРНОБОБОВЫХ КУЛЬТУР В ЦЕНТРАЛЬНЫХ ЧЕРНОЗЕМНЫХ ОБЛАСТЯХ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

***А.И. Страшная, Л.Л. Тарасова, Н.А. Богомолова,
Т.А. Максименкова, О.В. Береза***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации
ais@metcom.ru*

В настоящее время в условиях глобального изменения климата и агрометеорологических ресурсов в агрометеорологическом обеспечении сельского хозяйства, проводимом Росгидрометом, основное внимание уделяется всесторонней оперативной информации о влиянии складывающихся и ожидаемых погодных условиях, особенно экстремальных, на состояние и формирование продуктивности сельскохозяйственных культур. При этом очень важной составляющей такой информации являются прогнозы урожайности зерновых культур, так как в Российской Федерации, как и во многих странах мира, валовые сборы зерна являются основой продовольственной безопасности. Такие прогнозы весьма актуальны не только в годы, когда из-за неблагоприятных погодных условий ожидается значительный недобор урожая и использование прогнозов позволяет организовать превентивные мероприятия по минимизации ущерба (например, своевременные закупки зерна), но и в благоприятные годы для определения возможных объемов экспорта зерна и рынков сбыта. Они являются важным звеном в системе поддержки принятия управленческих решений в аграрном секторе, способствующих увеличению сельскохозяйственной

продукции, в связи с чем требования к их точности и заблаговременности существенно повысились.

Центральные черноземные области (Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая и Тамбовская области) являются одним из благоприятных в почвенно-климатическом отношении районов для производства зерна в Российской Федерации. Средний за последние пять лет валовой сбор зерна зерновых и зернобобовых культур в регионе составил 11,64 млн т, или 67 % от общего валового сбора зерна в Центральном федеральном округе и 14 % от всего валового сбора зерна в среднем за эти годы в Российской Федерации. В наиболее благоприятный по погодным условиям 2008 год в регионе было собрано 16,92 млн т зерна. Однако в годы, неблагоприятные по условиям увлажнения, урожайность и валовые сборы зерна значительно снижаются. Так, в годы сильных засух 1995, 1999 и 2010 гг. было собрано зерна соответственно 5,54, 5,40 и 5,55 млн т, т. е. более чем в три раза меньше, чем в 2008 г. Очень засушливым был здесь и 1998 г., когда было собрано 6,48 млн т зерна. Максимальная урожайность зерновых и зернобобовых культур в большинстве областей превышала минимальную в 2,5–3,0 раза. При столь больших колебаниях урожайности задача прогнозирования в настоящее время является достаточно трудной, оправдываемость прогнозов урожайности в отдельные годы снижается и не удовлетворяет потребителей. Наряду с колебаниями погодных условий одной из причин этого является сокращение в последние десятилетия агрометеорологических наблюдений сети гидрометстанций на производственных посевах, в связи с чем исходная информация об агрометеорологических факторах (показателях), на основе которых были построены прогностические модели урожайности в конце 80-х – начале 90-х годов, является недостаточно полной. В связи с этим в начале 2000-х годов агрометеорологи-прогнозисты обратились к проблеме использования данных дистанционного зондирования для оценки состояния сельскохозяйственных культур и прогнозирования урожайности [3, 6, 9, 11].

Возможность использования спутниковых данных в имеющихся и в новых создаваемых регрессионных физико-

статистических и динамико-статистических моделях прогнозирования урожайности появилась при возросшем уровне открытости доступа к этим данным. При этом большое значение имеют основополагающие разработки, связанные с созданием методов анализа спутниковых данных и технологий построения новых информационных систем агромониторинга, обеспечивших возможности регулярного получения однородной и объективной информации на больших площадях – на уровне страны, субъекта и региона. К такого рода методам и системам относятся, в частности, методы оценки состояния посевов, а также специализированный спутниковый веб-сервис ВЕГА, разработанные в ИКИ РАН [1, 2, 5, 9]. Проведенный в Гидрометцентре России анализ оценок состояния озимых культур осенью по серии карт, построенных в ИКИ РАН по данным спутниковых измерений, где используются качественные характеристики (состояние посевов хуже/лучше среднего), выявил их адекватность данным наземных наблюдений сети гидрометстанций. Совместные исследования специалистов Гидрометцентра России и ИКИ РАН, основанные на использовании многолетних рядов метеорологических данных наземных наблюдений и спутниковой информации, доступной в составе сервиса ВЕГА за исторический период с 2003 года, и регулярно обновляемых текущих данных измерений, показали реальную возможность и эффективность использованного нами приема комплексирования этих данных не только для оценки состояния озимых зерновых культур по декадам вегетации в осенний период, но и позволили разработать новый способ расчета количественной оценки площадей озимых, находящихся в плохом состоянии осенью ко времени прекращения вегетации. При сокращении проведения маршрутных обследований это имеет важное значение для практической оперативной деятельности по агрометеорологическому обеспечению сельского хозяйства [11]. На этой основе стали разрабатываться и модели прогнозирования урожайности. Ассимиляция спутниковых данных в базовую динамико-статистическую модель продукционного процесса растений [7] позволила создать новую усовершенствованную модель продукционного процесса кукурузы с использованием спутниковой информации и

на ее основе разработать метод прогноза урожайности кукурузы для Южного и Северо-Кавказского федеральных округов [6].

В настоящей работе была поставлена задача разработать новые регрессионные нелинейные модели для прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур (далее – зерновых), основанные на комплексировании метеорологических параметров с данными спутниковых измерений (нормализованным вегетационным индексом – NDVI) для центральных черноземных областей, а также исследовать возможность увеличения заблаговременности прогнозов. Здесь отметим, что этот показатель (NDVI) является основным параметром, получаемым на основе спутниковых данных, который применяется для мониторинга состояния и продуктивности посевов во многих странах мира. NDVI рассчитывается как отношение разности коэффициентов спектральной яркости в ближнем ИК (*NIR*) и красном (*red*) диапазонах к их сумме:

$$\text{NDVI} = \frac{P_{\text{NIR}} - P_{\text{red}}}{P_{\text{NIR}} + P_{\text{red}}}.$$

На первом этапе исследований необходимо было изучить изменчивость вегетационного индекса NDVI в центральных черноземных областях в разные по агрометеорологическим условиям годы, а также рассчитать его среднюю многолетнюю динамику в весенне-летний период вегетации зерновых культур, которая используется для сравнительной оценки состояния посевов в складывающихся погодных условиях конкретных лет. На рассматриваемой территории набор возделываемых сельскохозяйственных культур достаточно разнообразен (рис. 1). Однако в связи с тем, что озимые культуры здесь занимают наибольшие площади, нами использовались данные по NDVI озимых культур. Кроме того, озимые культуры в связи с более ранним развитием их весной детектируются с достаточной точностью [1, 2].

По данным за период с 2003 по 2013 г., доступным на веб-сервисе ВЕГА, были сформированы массивы значений NDVI в период весенне-летней вегетации (от возобновления вегетации до созревания) и рассчитаны средние многолетние значения этого

показателя по декадам для каждой из пяти областей региона. Средняя многолетняя динамика NDVI по декадам вегетации озимой пшеницы по Белгородской (юг) и Тамбовской (север территории) областям в сравнении с динамикой этого показателя в благоприятном 2008 г. и экстремально засушливом 2010 г. показана на рис. 2.

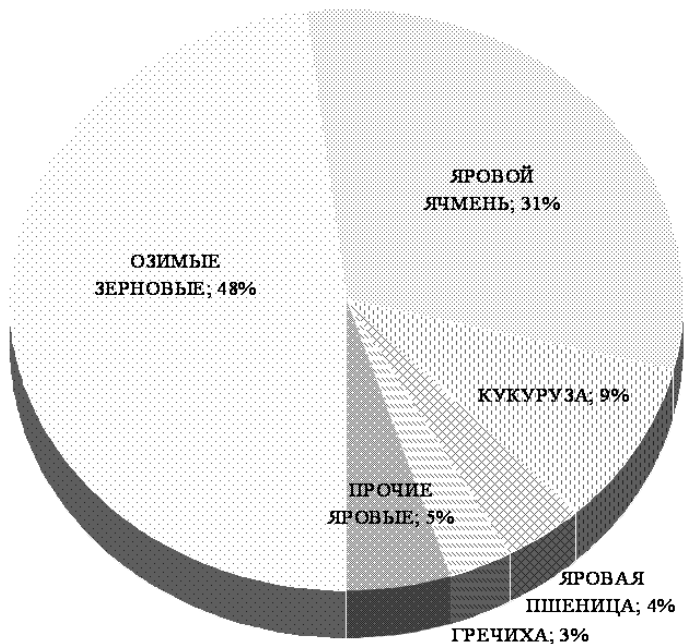
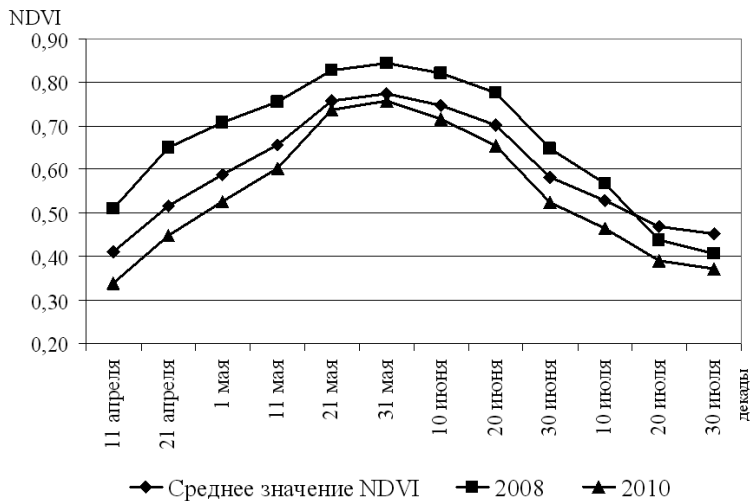
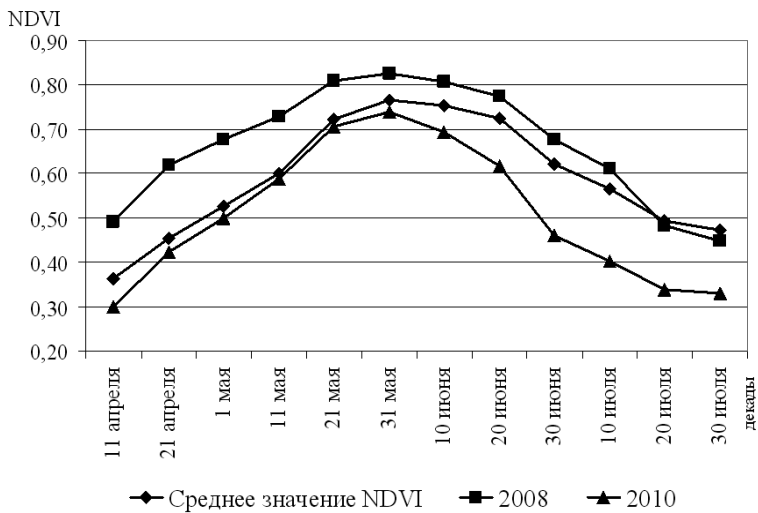


Рис. 1. Площади отдельных сельскохозяйственных культур в процентах от общей посевной площади зерновых и зернобобовых культур в центральных черноземных областях.



а)



б)

Рис. 2. Динамика NDVI по декадам весенне-летней вегетации озимой пшеницы по Белгородской (а) и Тамбовской областям (б).

Можно видеть, что в Белгородской области максимальное значение NDVI в среднем многолетнем разрезе приходится на третью декаду мая, а в более северной Тамбовской области – на первую декаду июня. При этом максимальные значения NDVI в засушливые и благоприятные годы существенно различаются. Так, например, в Тамбовской области в засушливом 2010 г. максимальное значение NDVI составило 0,76, а в благоприятном 2008 г. – 0,84. Динамика NDVI по годам в этих областях также различается, особенно во второй половине вегетации. Можно отметить, что в Тамбовской области в 2010 г., когда сильная атмосферная засуха в этой области наблюдалась уже в мае, гидротермический коэффициент увлажнения (ГТК) составил 0,60, что является критерием сильной атмосферной засухи, максимальное значение NDVI наблюдалось в конце третьей декады мая, т. е. на декаду раньше среднего многолетнего срока (10 июня), а затем его значение сразу начало резко снижаться.

В благоприятном по условиям увлажнения 2008 г., когда в мае засухи не было, резкого снижения NDVI не наблюдалось, динамика этого показателя была близкой к средней многолетней. Резкое снижение значений NDVI в период активной вегетации (до наступления фазы молочной спелости), как указывается в [9, 10], свидетельствует о стрессовом состоянии посевов. В Белгородской области, где в мае 2010 г. на преобладающей территории засухи не было, ГТК составил 1,2. Хотя максимальное значение NDVI было меньше обычного, но наблюдалось оно в сроки, близкие к средним многолетним, а затем снижение этих значений происходило медленно и плавно, ход динамики почти не отличался от среднего многолетнего.

Оценка состояния зерновых культур по отношению к средней многолетней, по данным спутниковых измерений в конкретный период времени, как показал проведенный нами анализ агрометеорологических условий, достаточно адекватно отображается визуально. Так, на рис. 3, например, хорошо видно, что в 2010 г. в Тамбовской области состояние зерновых культур в конце мая было уже хуже обычного на большинстве площадей, тогда как в Белгородской области площадь с таким состоянием была

незначительной. В начале июня, как можно видеть, состояние зерновых культур ухудшилось в ряде районов Воронежской области, где началась засуха. Использование таких карт, доступных в настоящее время для анализа состояния посевов в режиме реального времени на веб-сервисе ВЕГА, является весьма полезным, так как позволяет в дополнение к ограниченным наземным данным оценить состояние посевов на больших площадях по декадам вегетационного периода.

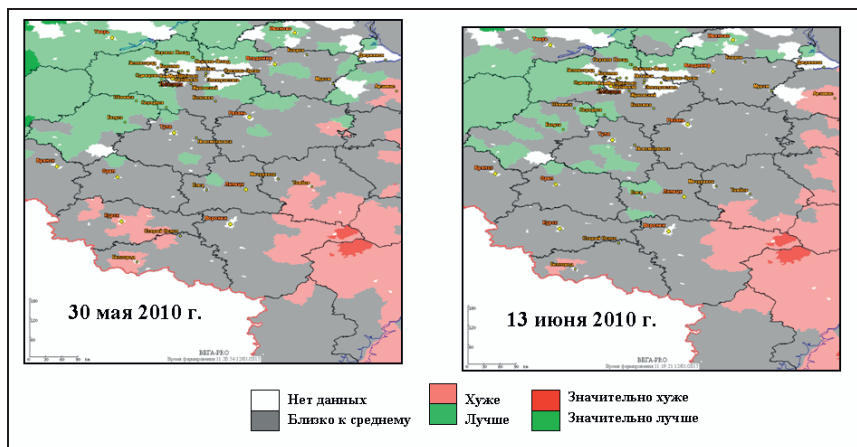


Рис. 3. Состояние озимых зерновых культур по данным спутниковых измерений (NDVI).

В дальнейших исследованиях на примере отдельных областей необходимо было определить реакцию на засуху биологической (надземной) массы растений по данным полевых наблюдений гидрометстанций, так как она является одним из наиболее важных показателей состояния сельскохозяйственных культур и их продуктивности [7, 13]. Было проведено исследование динамики NDVI в сравнении с динамикой биомассы озимой пшеницы (КСт-h), выраженной нами произведением общего количества стеблей на 1 кв. м (КСт), рассчитанного в среднем по субъектам по фактическим данным полевых наблюдений гидрометстанций, на

их высоту (h). В качестве примера динамика (КСг*h) в 2010 и 2008 гг. в сравнении с динамикой NDVI показана по Тамбовской области (рис. 4).

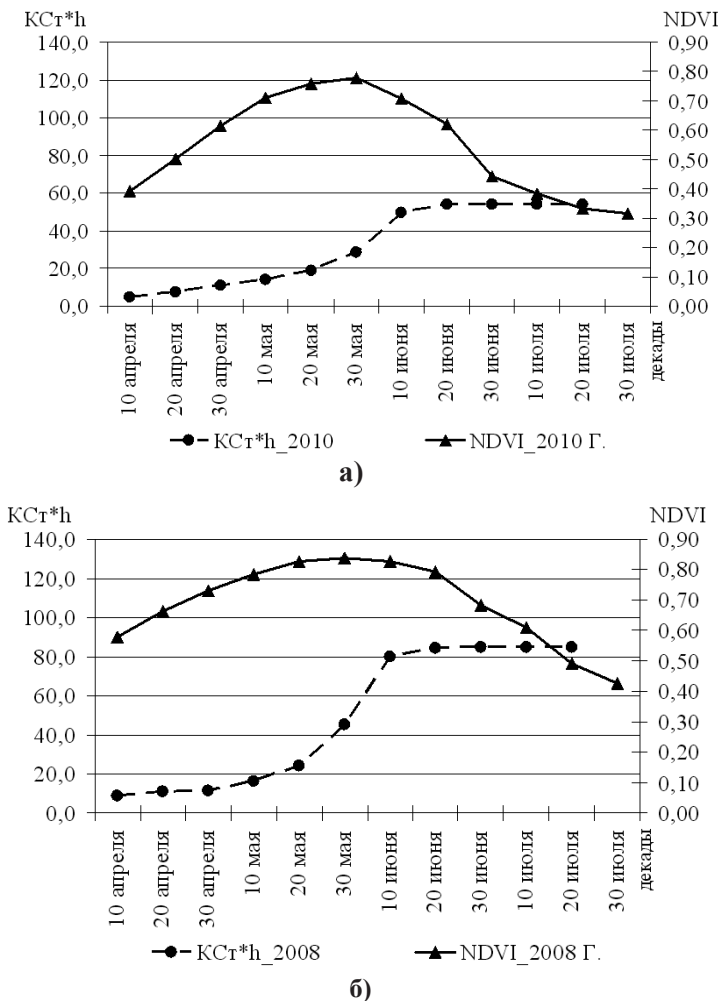


Рис. 4. Динамика биомассы (КСг*h) и NDVI по Тамбовской области в 2010 г. (а) и в 2008 г. (б).

Оказалось, что в годы сильных засух (например, в 2010 г.) значение NDVI в Тамбовской области достигало максимального уровня значительно раньше (в третьей декаде мая), чем (КСт·h), которая еще продолжала увеличиваться до 20 июня с выходом затем на плато, в то время как значение NDVI после достижения максимальных значений стало резко уменьшаться.

В 2008 г., благоприятном по условиям увлажнения, максимальное значение NDVI в Тамбовской области удерживалось до 10 июня, т.е. почти совпадало по времени с максимальным значением (КСт·h), затем уменьшение NDVI происходило медленнее, чем в 2010 г., когда оно было очень резким. Причину резкого уменьшения NDVI можно объяснить, анализируя сложившиеся агрометеорологические условия. Преобладание сухой жаркой погоды, наблюдавшейся в этой области в мае 2010 г., было неблагоприятным для зерновых культур, особенно озимой пшеницы, у которой в этот период начали формироваться репродуктивные органы [14]. В первой и второй декадах мая дневная температура воздуха повышалась до 29...31°, а средняя за эти декады температура превышала норму на 4–7°. Особенно жаркой оказалась первая декада, когда даже средняя за декаду температура воздуха составила 19,0 °С. Вероятность такой температуры в первой декаде мая в области составляет менее 2%. Анализ имеющихся в нашем распоряжении данных о температуре воздуха за эту декаду с 1945 г. показал, что такая же средняя температура воздуха наблюдалась лишь в аналогичную декаду мая в 1967 г., а близкая к ней (18,6°) – в 1996 г. По данным [4, 9], жаркая погода в условиях засухи и высокой солнечной инсоляции оказывает резко отрицательное воздействие на посевы, нарушая наряду с фотосинтезом, дыханием, водным режимом и поглощением элементов минерального питания. При усилении транспирации и начинающемся обезвоживании тканей растений в результате сложных окислительных процессов происходит разрушение (уменьшение) зеленых пигментов [4], что сказывается на отражательных характеристиках растительного покрова. Как следствие этой закономерности, в Тамбовской области уже в начале июня 2010 г. наблюдалось резкое уменьшение значений

NDVI. При этом (КСт·h), как видно на рис. 4, еще продолжала увеличиваться (хотя и очень медленно) за счет некоторого увеличения высоты стеблей в связи с тем, что растения могли использовать еще имевшуюся продуктивную влагу в почве.

Влагозапасы в почве в мае – начале июня в области понизились, но были еще удовлетворительными (20–26 мм в пахотном и 90–110 мм в метровом слоях почвы). Можно отметить, что, по данным гидрометстанций, в фазе цветения средняя высота озимой пшеницы в Тамбовской области в 2010 г., как и в отдельных районах Белгородской, Воронежской областей, была на 10–20 см меньше обычной для этой фазы. Таким образом, NDVI в засушливые годы, по-видимому, является более чувствительным показателем изменения состояния растений, чем (КСт·h), т. к. реагирует (снижается) даже в начале атмосферной засухи, что необходимо учитывать при оперативном агромониторинге состояния посевов и анализе динамики этого показателя в различные годы.

Для решения проблемы прогнозирования средней по областям урожайности зерновых культур были проведены исследования статистических рядов урожайности этих культур с посевной площади за период 1993–2013 гг. по данным Росстата. Оказалось, что изменчивость урожаев практически во всех областях значительная, среднее квадратическое отклонение (σ) составляет от 5,6 до 6,8 ц/га, и коэффициенты вариации (v) за этот период в основном 0,29–0,30 (табл. 1). Максимальные урожаи зерновых культур были получены в основном в благоприятные по условиям увлажнения годы – 2008 и 2013 гг., минимальные – в годы засух (1995, 1998, 1999 и 2010 гг.).

Необходимо отметить, что на величину урожайности зерновых культур в районах с преобладанием посевов озимых кроме условий в весенне-летний период в отдельные годы влияют и неблагоприятные агрометеорологические условия осенне-зимнего периода, из-за чего проблема прогнозирования урожайности является более сложной, чем в районах с преобладанием только яровых зерновых культур. Это особенно характерно для восточных районов территории, где в период осеннего сева

озимых культур, занимающих наибольшие площади, в отдельные годы наблюдаются засухи (например, в Белгородской и Липецкой областях в 2005 г., а также в Белгородской и Воронежской областях в 2009 г.), вызывающие изреженность всходов и сдвиг сроков сева на более поздние относительно оптимальных, что отрицательно сказывается на состоянии посевов [12]. На части площадей озимые повреждаются из-за сильных морозов при небольшом снежном покрове или его отсутствии (например, при сильном похолодании в январе 2010 г.).

Таблица 1

Изменчивость урожайности зерновых и зернобобовых культур в центральных черноземных областях за период с 1993 по 2013 г.

Территория (область)	Экстремальные значения урожайности				σ	ν
	низкая урожайность		высокая урожайность			
	ц/га	год	ц/га	год		
Белгородская	13,8	1995	36,8	2013	6,8	0,27
	16,8	2010	38,9	2008		
Воронежская	7,9	2010	26,1	2013	5,8	0,30
	10,6	1995	33,4	2008		
Курская	13,9	1998	34,2	2008	6,5	0,29
	14,3	1999	35,7	2013		
	15,0	1995				
Липецкая	12,2	1995	32,6	2013	6,8	0,29
	13,6	1996	33,7	2009		
	13,6	1999	36,5	2008		
Тамбовская	9,4	1995	27,3	2009	5,6	0,30
	11,0	1999	30,2	2013		
	11,3	2010	30,4	2008		

При анализе динамики урожайности зерновых культур за последние десятилетия (1993–2013 гг.) оказалось, что во всех

областях построенные за этот период тренды были положительными на фоне больших колебаний урожайности по годам. От начала к концу периода урожайность в среднем повышалась во всех областях, но скорость погодичного прироста урожайности различалась. Самой большой она была в Курской области (0,65 ц/год), а наименьшей в Воронежской области (0,32 ц/год). Для примера на рис. 5 показана динамика урожайности зерновых культур с посевной площади по Белгородской и Тамбовской областям, где урожайность от начала к концу периода увеличилась на 11,49 и 10,1 ц/га соответственно. Наиболее значительное увеличение урожайности наблюдалось в Курской области – на 13,7 ц/га, а в Воронежской области это увеличение составило всего 6,6 ц/га.

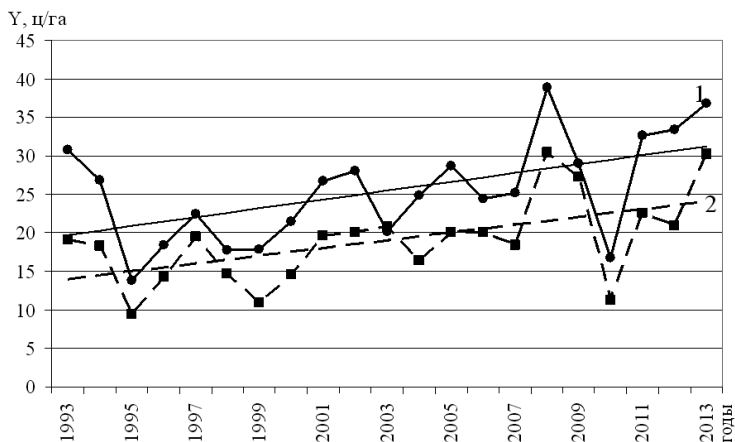


Рис. 5. Динамика урожайности зерновых культур с посевной площади по Белгородской (1) и Тамбовской (2) областям.

Анализ хорошо выраженных положительных трендов урожайности зерновых культур в центральных черноземных областях показал, что наблюдаемый рост урожайности в значительной степени обусловлен ростом культуры земледелия – сменой сортов на более высокоурожайные, улучшением агротехники возделывания зерновых культур (соблюдение оптимальных сроков

сева, своевременная обработка посевов средствами защиты, увеличение доз удобрений и т. д.). Улучшения агрометеорологических условий в этот период практически не наблюдалось. Изменение агрометеорологических условий (увлажнения и термического режима) мы выявили, построив тренды показателей этих условий – ГТК и температуры воздуха. Во всех областях построенные тренды ГТК, рассчитанного нами в среднем по субъектам за май-июнь (наиболее важный для формирования урожая период), свидетельствуют о незначительном ухудшении условий увлажнения. В Тамбовской области, например, наблюдалось уменьшение ГТК от начала к концу периода от 1,25 до 0,91 (от хорошего увлажнения до слабой засушливости). В Белгородской области тренд ГТК за эти месяцы (рис. 6) практически не выражен (ГТК изменялось от 1,20 до 1,10, т. е. незначительно).

Можно отметить, что сильные засухи в этот период, когда значения ГТК за май-июнь составляли 0,60 и менее, наблюдались в Тамбовской области в 1995, 1998, 2010 и 2011 гг., в Белгородской области в 1998 и 2003 гг. В то же время тренд ГТК в мае во всех областях выражен более четко. В Тамбовской области ГТК от начала к концу периода уменьшился от 1,22 до 0,75, в Белгородской области от 1,20 до 0,92. При этом можно констатировать, что сильные, но непродолжительные (только в мае) засухи наблюдались чаще: в Белгородской области, например, они наблюдались в трех годах рассмотренного периода, в то время как в Тамбовской области – в семи годах, т. е. в 33 % лет май в этой области был засушливым. Почти аналогичная ситуация отмечалась и в других областях.

Важно отметить, что тренды средней температуры воздуха за май-июнь, как и тренды ГТК за эти месяцы, выражены слабее, чем тренды температуры за май (рис. 7). Скорость роста средней температуры за май-июнь составляла в основном 0,07–0,08 °/год, в то время как за май – 0,20–0,22 °/год, т. е. рост температуры воздуха в мае был более значительным, чем в период май-июнь. Проведенные исследования выявили более значительные изменения агрометеорологических условий вегетации зерновых

культур (в основном ухудшение условий увлажнения) в мае, что необходимо учитывать при разработке прогностических моделей.

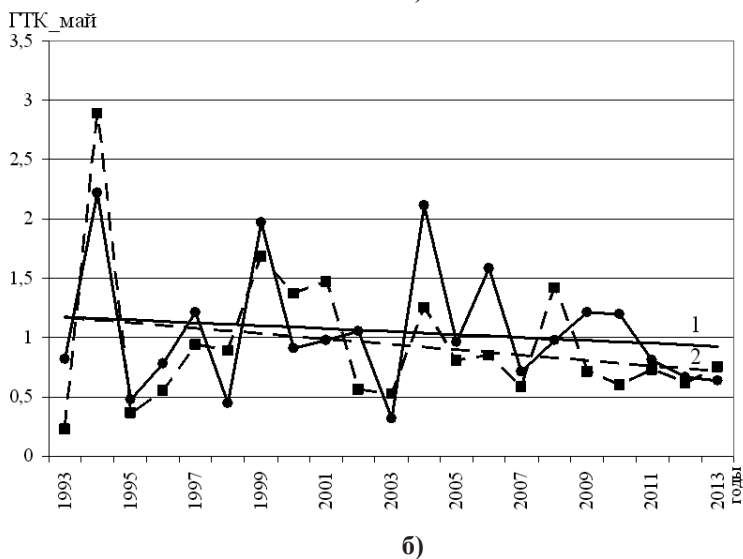
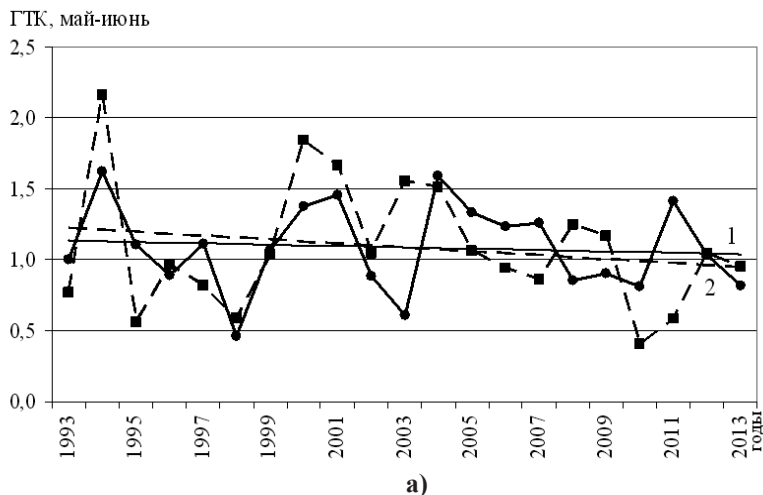
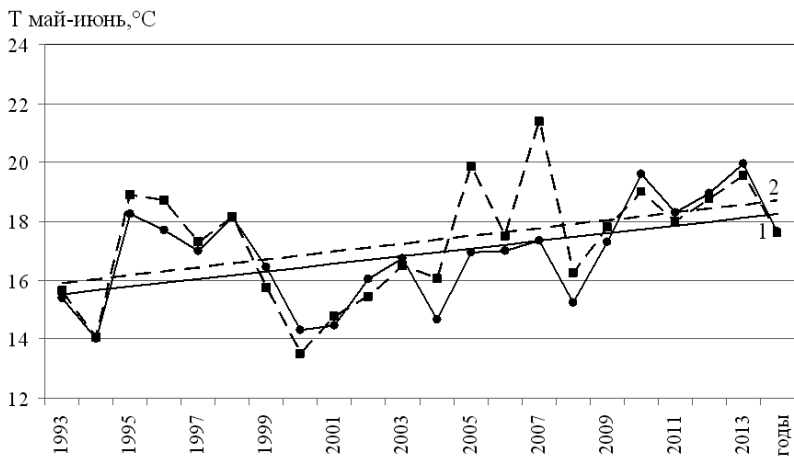
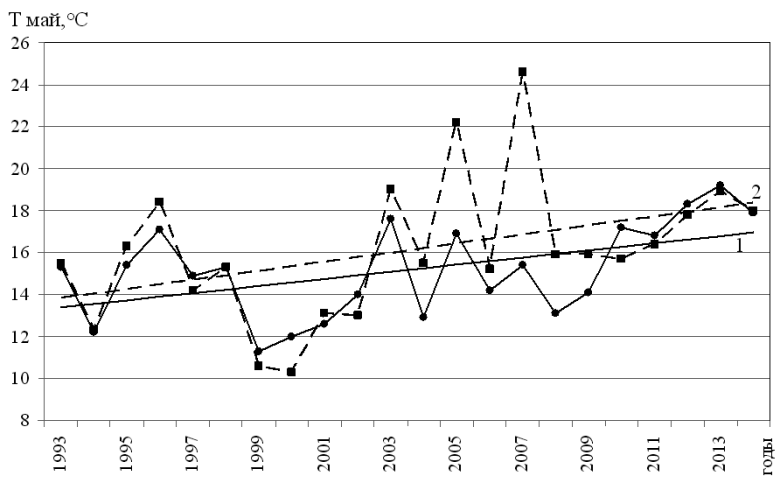


Рис. 6. Динамика ГТК за май-июнь (а) и за май (б) по Белгородской (1) и Тамбовской (2) областям.



а)



б)

Рис. 7. Динамика средней температуры воздуха за май-июнь (а) и за май (б) по Белгородской (1) и Тамбовской (2) областям.

В наших исследованиях по разработке методов прогнозирования урожайности зерновых культур в изменившихся агрометеорологических условиях увлажнения и термического режима использовались методы корреляционного и графического анализов, позволившие выявить тесноту связей урожайности зерновых культур с посевной площадью с метеорологическими факторами (температура, дефицит влажности воздуха, гидротермический коэффициент увлажнения, запасы влаги) и вегетационным индексом (NDVI) по декадам и месяцам весенне-летней вегетации (всего исследовалось 18 факторов). Коэффициенты корреляции урожайности с большинством указанных факторов колебались в основном от 0,28 до 0,56, наиболее тесная корреляция по отдельным областям наблюдалась с месячными значениями указанных факторов (r от 0,36 до 0,69). В качестве примеров связь урожайности зерновых культур с запасами продуктивной влаги в метровом слое почвы (W_{0-100} , мм) в декаду после возобновления вегетации по Белгородской области, а также с ГТК в мае и дефицитом влажности воздуха (d , гПа) в июне по Липецкой области и с NDVI в мае по Курской области, приведены на рис. 8. В то же время была выявлена достаточно тесная связь NDVI в июне с урожайностью зерновых культур в отклонениях от тренда (рис. 9), что указывает на возможность прогнозирования отклонений урожайности относительно тренда, в том числе на основе использования NDVI.

Нами также были рассчитаны матрицы парных коэффициентов корреляции (за 2003–2013 гг.) между средней по центральным черноземным областям урожайностью зерновых культур и значениями NDVI (по маске озимых культур) по декадам вегетации. Анализ этих коэффициентов и построенных на их основе временных корреляционных функций позволил выявить периоды наиболее тесных связей урожайности зерновых культур со значениями вегетационных индексов. В качестве примера такие функции (динамика тесноты связей, или коэффициентов корреляции r) по Белгородской и Липецкой областям представлены на рис. 10.

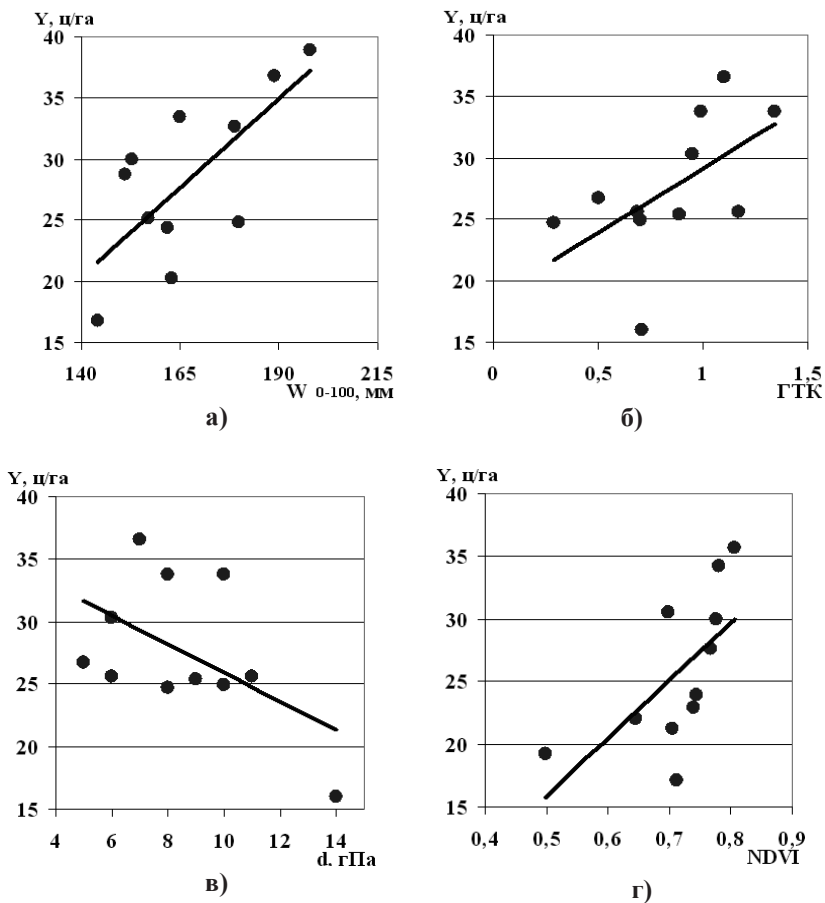


Рис. 8. Связь урожайности зерновых культур с запасами продуктивной влаги в метровом слое почвы в декаду после возобновления вегетации по Белгородской области (а); с ГТК в мае (б) и дефицитом влажности воздуха в июне (в) по Липецкой области; с NDVI в мае по Курской области (г).

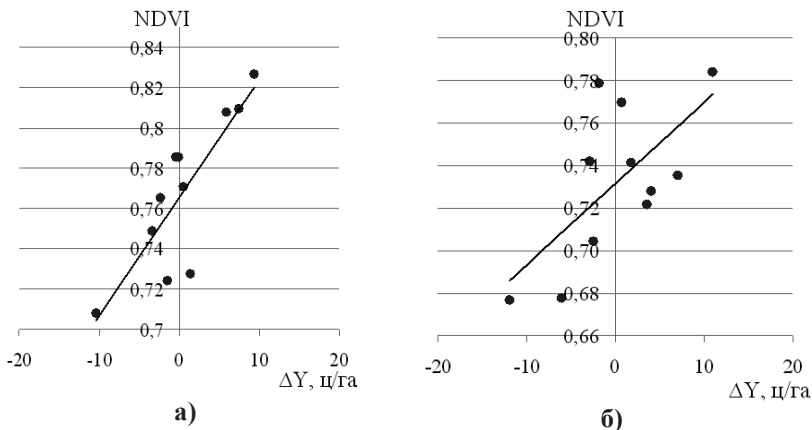


Рис. 9. Связь NDVI в июне с урожайностью зерновых культур в отклонениях от тренда по Белгородской (а) и Тамбовской областям (б).

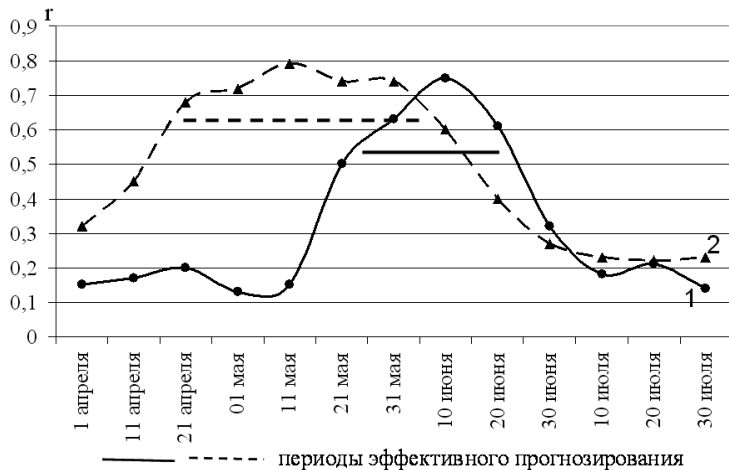


Рис. 10. Связь урожайности зерновых культур с NDVI (динамика коэффициентов корреляции r) за период 2003–2013 гг. по декадам вегетации в Липецкой (1) и Белгородской областях (2).

Тесная связь урожайности зерновых культур с NDVI ($r=0,66$ и более) в южных областях рассмотренной территории (например, Белгородская область) наблюдается уже во второй декаде апреля, когда у озимых культур наблюдается фаза «выход в трубку» и такая связь сохраняется до конца первой декады июня, когда выход в трубку и закладка колоса наблюдается и у ранних яровых зерновых культур, а у озимых наблюдается цветение. Столь тесная связь позволяет сделать вывод о возможности оценки урожайности зерновых культур в этой области в течение указанного периода (хуже, лучше средней), а также в Воронежской и Курской областях на основе NDVI. При этом необходимо использовать вспомогательные графики хода средних многолетних значений NDVI. Сравнивая значения NDVI по декадам текущего года со средними многолетними, можно оценить состояние посевов не только качественно, но и наблюдаемое отклонение выразить в процентах от среднего. Максимальное значение тесноты связи NDVI с урожайностью в Белгородской области приходится в среднем на период 10–31 мая ($r=0,73-0,76$).

В более северных областях региона (например, Липецкая область) тесная связь ($r=0,56$ и более) урожайности зерновых культур с NDVI проявляется позже (в третьей декаде мая), в связи с чем такая оценка и эффективный период для прогнозирования возможны с конца мая по 20 июня. Отметим, что для каждой области целесообразно строить свои временные корреляционные функции, уточняя их по мере дальнейшего увеличения временных рядов NDVI. Указанные значения тесноты связей урожайности с NDVI в этот период свидетельствуют и о возможности использования этого показателя в прогностических моделях.

В настоящее время прогнозы урожайности зерновых культур составляются в Росгидромете в конце июня и в конце июля. Для увеличения заблаговременности прогнозов (составления их в конце мая) строились регрессионные модели, в которых в качестве параметров были использованы наиболее значимые для формирования урожайности метеорологические факторы (показатели) за май, а также NDVI, осредненные по территории областей. В отдельных южных областях (Белгородская область)

выявлена тесная связь урожайности зерновых культур в более ранний период не только с NDVI, но и с запасами продуктивной влаги после возобновления вегетации ($r=0,70$ и более), что, на наш взгляд, дает возможность очень раннего прогнозирования урожайности. По данным [13], ресурсы влаги в почве весной в черноземной зоне России в значительной степени определяют будущий урожай зерновых культур, и особенно озимых, которые преобладают в этих районах. Наши исследования выявили, что наибольшая теснота связей урожайности зерновых культур наблюдается в этой области с осредненными запасами продуктивной влаги в метровом слое почвы за третью декаду апреля ($W_{0-100,4-3}$). Использование NDVI в комплексе с запасами продуктивной влаги при построении прогностической модели показало вполне удовлетворительные результаты. Полученное уравнение (модель) для Белгородской области имеет вид:

$$Y_{зер} = 31,905 \text{ NDVI}_{4-3} + 0,20 W_{0-100,4-3} - 23,769, \quad R = 0,84;$$

где $Y_{зер}$ – ожидаемая урожайность зерновых культур; NDVI_{4-3} – значения NDVI за третью декаду апреля; $W_{0-100,4-3}$ – запасы продуктивной влаги в почве за ту же декаду.

Для составления прогнозов урожайности зерновых культур в мае были получены прогностические модели, позволяющие прогнозировать урожайность на основе комплексирования наземных и спутниковых данных непосредственно в ц/га и в отклонениях урожайности от трендов (табл. 2). При этом метеорологические параметры рассчитывались в среднем за май, а значения NDVI использовались за декаду, в которой связь с урожайностью была наиболее тесной. Для расчета урожайности в отклонениях от тренда на первом этапе необходим расчет тренда или тенденции временного ряда урожайности. Для центральных черноземных областей, как указывалось выше, характерен рост урожайности за счет улучшения культуры земледелия, который удовлетворительно описывается уравнениями прямой. Для Тамбовской области, например, такое уравнение имеет вид $Y_{mp} = 0,58 n + 18,16$, где Y_{mp} – урожайность зерновых культур, рассчитанная по тренду; n – порядковый номер года (2003 год –

$n = 1$). В таких случаях расчет ожидаемой урожайности $Y_{зер}$ будет следующим: $Y_{зер} = Y_{тр} + \Delta Y$.

Таблица 2

Значения коэффициентов регрессии в прогностических моделях урожайности и множественные коэффициенты корреляции (май)

Территория (область)	a_1	a_2	a_3	a_4	C	R
Урожайность зерновых культур Y, ц/га						
Липецкая	0,049			56,96	-16,76	0,46
Курская	-7,23		139,16		-72,82	0,78
Воронежская	2,32		30,76		-2,85	0,45
Тамбовская	2,99			23,29	2,48	0,49
Белгородская		-0,026	76,37		-27,86	0,72
Урожайность (в отклонениях от тренда) ΔY, ц/га						
Липецкая	12,04		0,077		-10,15	0,70
Курская	0,75		69,07		-53,47	0,64
Воронежская	3,69		16,42		-14,87	0,45
Тамбовская	6,20			9,70	-11,82	0,49
Белгородская		-0,16	46,39		-32,81	0,58

Примечание: a_1 – коэффициент при ГТК₅; a_2 – коэффициент при d_5
 a_3 – коэффициент при вегетационном индексе NDVI₅₋₂;
 a_4 – коэффициент при вегетационном индексе NDVI₅₋₃;
C – свободный член уравнения;
R – множественный коэффициент корреляции.

Были также разработаны модели для составления прогнозов урожайности зерновых культур в июне. В этих моделях в качестве параметров использовались в основном те же факторы, что и в моделях для прогноза урожайности в мае, но рассчитанные в среднем по областям за июнь (табл. 3). Множественные коэффициенты корреляции в этих моделях были выше, чем в моделях для составления прогноза в мае (табл. 2). В то же время прогнозы урожайности зерновых культур, составляемые в конце мая, весьма востребованы, их можно считать важными и эффективными в связи с тем, что заблаговременность прогнозов увеличивается на месяц.

Значения коэффициентов регрессии в прогностических моделях урожайности и множественные коэффициенты корреляции (июнь)

Территория (области)	Урожайность зерновых культур (У, ц/га)			Урожайность (в отклонениях от тренда), У (ц/га)		
	a_1	a_2	R	a_1	a_2	R
Липецкая	-0,85	97,71	0,86	-0,91	96,85	0,87
Курская	0,23	92,48	0,64	-1,011	68,33	0,78
Воронежская	-0,70	59,59	0,69	-0,94	58,67	0,74
Тамбовская	-0,26	117,78	0,83	-0,74	101,91	0,91
Белгородская	0,03	113,08	0,60	-1,04	90,30	0,82

Примечание:

a_1 – коэффициент при d_6 ;

a_2 – коэффициент при вегетационном индексе $NDVI_{6-1}$;

C – свободный член уравнения;

R – множественный коэффициент корреляции.

Следует отметить, что все метеорологические параметры, входящие в модели, в автоматизированном режиме рассчитываются по данным декадных агрометеограмм, поступающих в Гидрометцентр России с использованием прикладных статистических программ, имеющихся на рабочих местах прогнозиста-агрометеоролога в локальной вычислительной сети Гидрометцентра – PROMETEI [8]. Текущие значения NDVI берутся с сервиса ВЕГА-PRO.

На рис. 11 приведены данные по фактической и расчетной (по данным за июнь) урожайности зерновых культур по Липецкой области за период с 2003 по 2013 г. Можно видеть, что в большинстве лет они хорошо согласуются.

Проверка прогнозов, проведенная за период 2003–2013 гг. показала, что ошибки прогнозов, составленных в конце мая с учетом комплексирования наземных и спутниковых данных, в 90 % случаев составляли 8–19 %, а прогнозов, составленных в июне, 6–15 %, что говорит о возможности применения разработанных нами моделей в оперативной практике после проведения производственных испытаний.

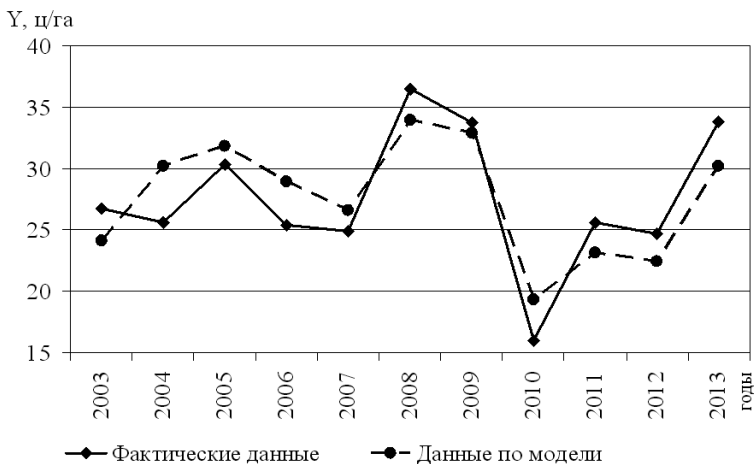


Рис. 10. Фактические и расчетные значения урожайности зерновых культур по Липецкой области.

Список использованных источников

1. *Барталев С.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А., Савин И.Ю.* Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS // Исследование Земли из космоса. – 2006. – № 3. – С. 68–75.
2. *Барталев С.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А., Савин И.Ю.* Дистанционная оценка параметров сельскохозяйственных земель по спутниковым данным спектрорадиометра Modis // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2005. – Т. 2, № 2. – С. 228–236.
3. *Клещенко А.Д.* Агрометеорологическое и агроклиматическое обеспечение аграрного сектора экономики России // Труды ВНИИСХМ. – 2010. – Вып. 37. – С. 5–21.
4. *Кошкин Е.И.* Физиология устойчивости сельскохозяйственных культур: учебник. – М.: Дрофа, 2010. – 638 с.
5. *Лупян Е.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Толпин В.А., Балашов И.В., Плотников Д.Е.* Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности ("Вега") // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8, № 1. – С. 190–198.
6. *Найдина Т.А.* Динамико-статистические методы прогноза урожайности кукурузы по субъектам Приволжского и Центрального федеральных округов // Труды ВНИИСХМ. – 2013. – Вып. 38. – С. 321–345.
7. *Полевой А.Н.* Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. Монография. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – С. 3–319.
8. *Пурина И.Э., Страшная А.И., Чекулаева Т.С., Игнатова Н.С.* Технология обработки и доведения конечной агрометинформации до потребителей в Гидрометцентре России и оперативно-производственных учреждениях Росгидромета в программном комплексе PROMETEI // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 103–120.
9. *Савин И.Ю., Лупян Е.А., Барталев С.А.* Оперативный спутниковый мониторинг состояния посевов сельскохозяйственных культур России // GEOMATICS. – 2011. – № 2. – С. 69–76.
10. *Сапрыкин Е.И., Сладких Л.А., Пчельников Д.В.* Оценка состояния посевов зерновых культур по данным дистанционного зондирования земли // Информационные технологии, системы и приборы в АПК. Ч. 1. Материалы 5-ой международной научно-практической конференции «АГРОИНФО-2012» в 2 ч. (Новосибирск, 10-11 октября 2012 г.). Часть 1.

– Новосибирск: Рос. акад. с.-х. наук, Сиб. регион. отд-ние, Сиб. физико-техн. ин-т аграр. проблем, 2012. – С. 387–390.

11. *Страшная А.И., Барталев С.А., Максименкова Т.А., Чуб О.В., Толпин В.А., Плотников Д.Е., Богомолова Н.А.* Агрометеорологическая оценка состояния озимых зерновых культур в период прекращения вегетации с использованием наземных и спутниковых данных на примере Приволжского федерального округа // Труды Гидрометцентра России. – 2014. – Вып. 351. – С. 85–105.

12. *Страшная А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В.* О сроках сева озимых культур в условиях изменения климата и их прогнозирование в Приволжском федеральном округе // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 345. – С. 175–193.

13. *Уланова Е.С.* Агрометеорологические условия и урожайность озимой пшеницы. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 301 с.

14. *Фролов А.В., Страшная А.И.* О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур // Сборник докладов по итогам Совместного заседания Президиума Научно-технического совета Росгидромета и Научного совета Российской академии наук «Исследования по теории климата Земли» (г. Москва, 28 октября 2010 г.). – 2011. – С. 22–31.

Поступила в редакцию 15.01.2015 г.