

О возможности прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Среднем Поволжье на основе комплексирования наземных и спутниковых данных

О.В. Береза ¹, А.И. Страшная ¹, Е.А. Лупян ²

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
Москва, 123242, Россия
E-mail: ais@metcom.ru*

*²Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: evgeny@smis.iki.rssi.ru*

В статье исследована динамика вегетационного индекса NDVI, получаемого на основе спутниковых измерений в засушливые годы и в годы с достаточным увлажнением по субъектам территории Среднего Поволжья. Установлены зависимости урожайности озимой пшеницы от метеорологических факторов. На основе установленных связей урожайности пшеницы с NDVI показана средняя многолетняя динамика коэффициентов корреляции между урожайностью пшеницы и NDVI за 2003-2013 гг. по декадам весенне-летнего периода вегетации. Установлены периоды, когда прогнозирование урожайности возможно с наибольшей точностью. Разработаны регрессионные физико-статистические модели для прогнозирования средней по субъектам урожайности озимой пшеницы в изменившихся агроклиматических условиях последних десятилетий с использованием метеорологических факторов и моделей, полученных на основе комплексирования наземных и спутниковых данных. Заблаговременность прогнозирования увеличилась на один месяц.

Ключевые слова: прогнозирование урожайности, озимая пшеница, вегетационный индекс состояния растительности NDVI, агрометеорологические условия, регрессионные модели.

Сельскохозяйственное производство взаимодействует со сложной системой природных условий, из числа которых климат и погода являются самыми динамичными и активными. В связи с этим в настоящее время в условиях глобального изменения климата в агрометеорологическом обеспечении сельского хозяйства, проводимом Росгидрометом, основное внимание уделяется всесторонней оперативной информации о влиянии складывающихся и ожидаемых погодных условий, особенно экстремальных, на состояние и формирование продуктивности сельскохозяйственных культур. При этом очень важной составляющей такой информации является прогноз урожайности зерновых культур, так как в Российской Федерации, как и во многих странах, 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, своевременной закупке зерна), но и в благоприятные годы – для определения возможных объемов экспорта зерна и рынков сбыта. Они являются важным звеном в системе поддержки принятия решений в аграрном секторе, способствующих увеличению сельскохозяйственной продукции, в связи с чем требования к их точности и заблаговременности существенно повысились.

Последние десятилетия в условиях значительного сокращения полевых агрометеорологических наблюдений сети гидрометстанций Росгидромета на производственных посе-

вах информация о состоянии сельскохозяйственных культур на больших площадях является недостаточно полной. В связи с этим с начала 2000-х годов многие исследователи обратились к проблеме использования данных дистанционного зондирования для оценки состояния сельскохозяйственных посевов и прогнозирования урожайности (Барталев и др., 2006; Барталев и др., 2005; Клещенко, 2010; Лупян и др., 2009; Мурынин и др., 2013; Савин и др., 2011; Страшная и др., 2014; Толпин и др., 2007; Толпин и др., 2014).

Возможность использования спутниковых данных в имеющихся и новых создаваемых регрессионных физико-статистических и динамико-статистических моделях прогнозирования урожайности появилась при возросшем уровне открытости доступа к этим данным. В частности, ассимиляция спутниковых данных в существующие прогнозные модели развития сельскохозяйственных растений позволяет создавать новые методы оценки их состояния и прогнозирования, что подтверждается, в том числе, и опытом Росгидромета (Клещенко, 2010; Страшная и др., 2014). 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 (<http://pro-vega.ru/>), разработанный в ИКИ РАН (Лупян и др., 2014; Лупян и др., 2011; Страшная и др., 2014; Толпин и др., 2014). Проведенный в Гидрометцентре России анализ оценок состояния озимых культур по серии карт (ИКИ РАН), построенных 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 к моменту прекращения вегетации (Страшная и др., 2014).

Для целей мониторинга состояния озимых культур в Среднем Поволжье в весенне-летний период нами по историческим данным за 2003-2013 гг. была рассчитана динамика NDVI по декадам для субъектов указанной территории и проведен анализ хода динамики этого показателя в разные по условиям увлажнения годы. Оказалось, что в засушливые и влажные годы ход динамики несколько отличается даже в субъектах с практически сходными агроклиматическими условиями. На *рис. 1* показана динамика NDVI в экстремально засушливый 2010 год и достаточно влажный 2011 год в Самарской и Оренбургской областях.

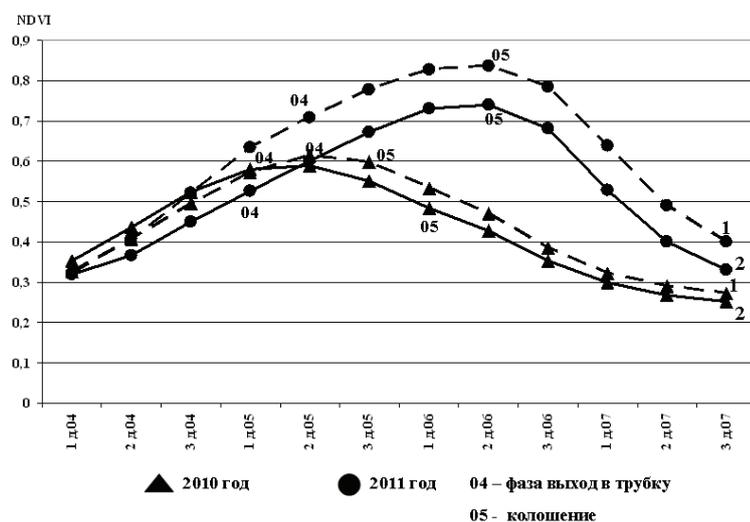


Рис. 1. Динамика значений NDVI в 2010 и 2011 гг. по Самарской (1) и Оренбургской (2) областям

Так, например, максимальное значение NDVI в Самарской и Оренбургской областях в 2010 г. наблюдалось во второй декаде мая. При этом в Самарской области максимальное значение NDVI в 2010 году удерживалось (наблюдалось) до конца мая, т. е. в течение всей следующей декады, тогда как в Оренбургской области, где засушливые условия в этом году были выражены в большей степени, уже в начале третьей декады мая оно начало резко уменьшаться. Гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова – ГТК (Синицина и др., 1973) в Самарской области в мае 2010 года составил 0,45, что соответствует сильной засухе, а в Оренбургской – 0,11, что характеризует очень сильную засуху (в соответствии с принятыми в Росгидромете критериями сильная атмосферная засуха характеризуется $ГТК \leq 0,60$, а очень сильная $\leq 0,30$).

Весьма наглядно состояние озимых культур по значениям отклонений NDVI от средних многолетних значений в Приволжском федеральном округе представлено на картах (рис. 2а, б). Схема расчетов таких отклонений достаточно подробно обсуждается в работе (Толпин и др., 2014).

При исследовании динамики NDVI и биомассы озимой пшеницы, условно выраженной нами произведением общего количества стеблей пшеницы на 1 кв.м (k) по фактическим данным полевых наблюдений гидрометстанций на их высоту (h), т. е. (k*h), оказалось, что в годы сильных засух в субъектах Среднего Поволжья (например, в экстремально жесткую засуху 2010 г.) NDVI достигало максимального значения раньше (во второй декаде мая, или за декаду до колошения), чем максимальная величина k*h, которая продолжала увеличиваться до второй декады июня.

Причина такой ситуации в значительной степени объясняется сложившимися агрометеорологическими условиями. Так, в последние дни апреля – начале мая 2010 г. на территории Заволжья, в том числе в Самарской области, установилась аномально жаркая и сухая погода. В первой и второй декадах мая дневная температура воздуха при отсутствии осадков была на уровне 30-33°, а средняя за эти декады температура превышала норму

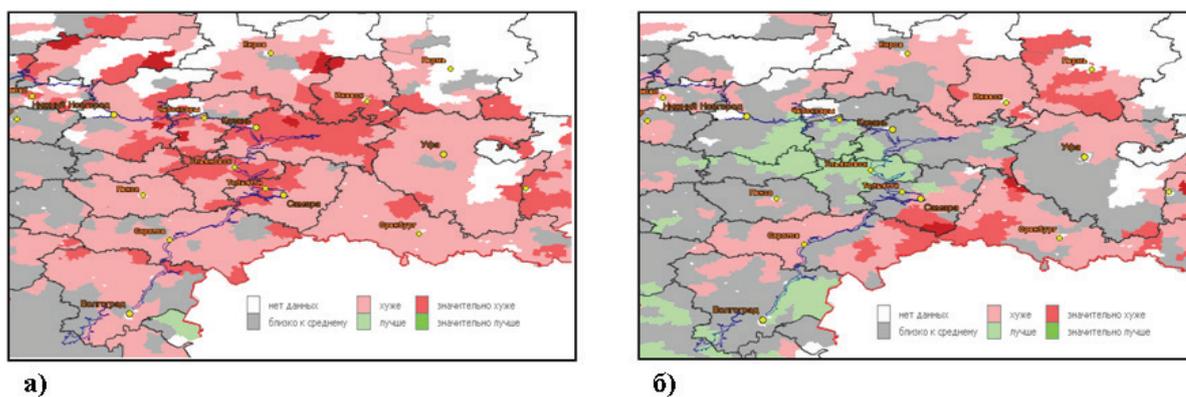


Рис. 2. Состояние озимых культур в Приволжском федеральном округе на 06.06.2010 (а) и на 05.06.2011 г. (б)

на 5-6°. Для первой декады мая, например, вероятность такой жаркой погоды составляет менее 5%. Гидротермический коэффициент в мае составил 0,35, т. е. наблюдалась сильная атмосферная засуха. По данным (Кошкин, 2010; Савин и др., 2011), 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 (Кошкин, 2010), что сказывается на отражательных характеристиках растительного покрова и, как следствие, наблюдается уменьшение значений NDVI. При этом $k \cdot h$, как видно на рис. 3 еще продолжала (хотя и медленно) увеличиваться за счет увеличения высоты стеблей, в связи с тем, что в какой-то степени растения еще могли использовать имевшуюся продуктивную влагу в почве. Хотя влагозапасы в почве в мае понизились, но они были еще близки к удовлетворительным (даже в пахотном слое 19 мм), почвенная засуха здесь началась в июне. Таким образом, NDVI в засушливые годы, по-видимому, является более чувствительным показателем изменения состояния растений, чем $k \cdot h$ даже в начале засухи, что необходимо учитывать при мониторинге состояния посевов и анализе динамики этого показателя в различные годы. В годы, благоприятные по условиям увлажнения (2011 г.), максимальное значение NDVI и $k \cdot h$ практически совпадали (рис. 3).

Для решения наиболее важной в современных условиях проблемы прогнозирования средней по субъектам урожайности зерновых культур, в частности – озимой пшеницы, одной из основных культур в Приволжском федеральном округе, крупном производителе зерна в Российской Федерации, в настоящей работе был применен указанный выше подход комплексирования наземных и спутниковых данных. Укажем, что при существенно меньшей площади, занимаемой озимыми культурами, они дают до 30-35% валового сбора зерна, производимого в округе.

Как известно, особенностью климата Приволжского федерального округа являются часто повторяющиеся засухи, что существенно снижает его сельскохозяйственный потенциал, особен-

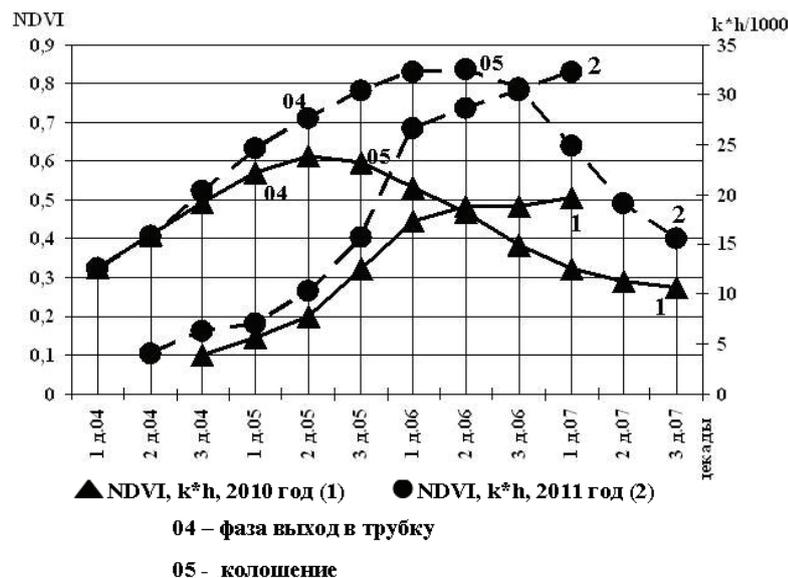


Рис. 3. Сезонная динамика значений NDVI и k^*h по декадам в 2010 и 2011 гг. по Самарской области (озимая пшеница)

но в субъектах южной половины округа (т. е. в Среднем Поволжье), где засухи наиболее часты. Исследования по разработке метода прогнозирования урожайности озимой пшеницы проводились по субъектам указанной территории, где дисперсия урожаев этой культуры значительно больше, чем в других регионах, что создает значительные трудности в прогнозировании урожая. Необходимо отметить также, что на величину урожайности озимой пшеницы в указанных районах влияют не только агрометеорологические условия весенне-летней вегетации, но и условия осенне-зимнего периода, особенно в годы с неблагоприятными условиями зимовки. В осенний период здесь также нередки засухи, вызывающие изреженность озимых культур и сдвиг сроков сева на более поздние относительно оптимальных (Страшная и др., 2011). В отдельные годы озимые повреждаются из-за сильных морозов при небольшом снежном покрове или его отсутствии (Моисейчик, 1975). Совокупный вклад этих условий в конкретные годы по разным оценкам (Моисейчик, 1975; Страшная и др., 2011; Уланова, 1975) составляет от 15 до 40%.

Общие коэффициенты вариации урожайности озимой пшеницы с посевной площади ($V_{об}$), рассчитанные за период с 1993 по 2013 гг. ($V_{об} = \delta : \text{уср.}$), составляют 0,32-0,45, что указывает на большую изменчивость урожайности, особенно в Саратовской и Оренбургской областях (табл. 1). В то же время озимая пшеница на большей части территории Поволжья является страховой культурой, так как в связи с ранним развитием она наиболее полно использует накопленные к весне влагозапасы в почве и урожайность ее практически во все годы превосходит урожайность яровой пшеницы. По большинству субъектов Среднего Поволжья за последние десять лет максимальная урожайность озимой пшеницы в 2-3 раза превышала минимальную за этот период.

Интересно отметить, что динамика урожайности в субъектах этого региона за 1993-2013 гг. была различной, рассчитанные нами тренды урожайности за этот период характеризовались разнонаправленностью (рис. 4). Так, в Самарской, Оренбургской, Саратовской областях урожай-

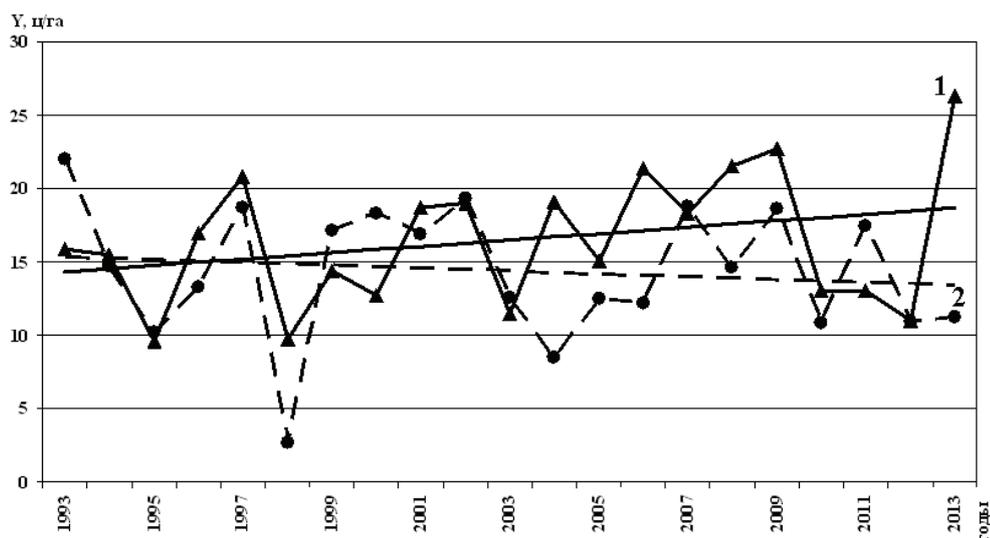


Рис. 4. Динамика урожайности озимой пшеницы (Y,ц/га) в Пензенской (1) и Оренбургской (2) областях (2003-2013 гг.) и линии трендов

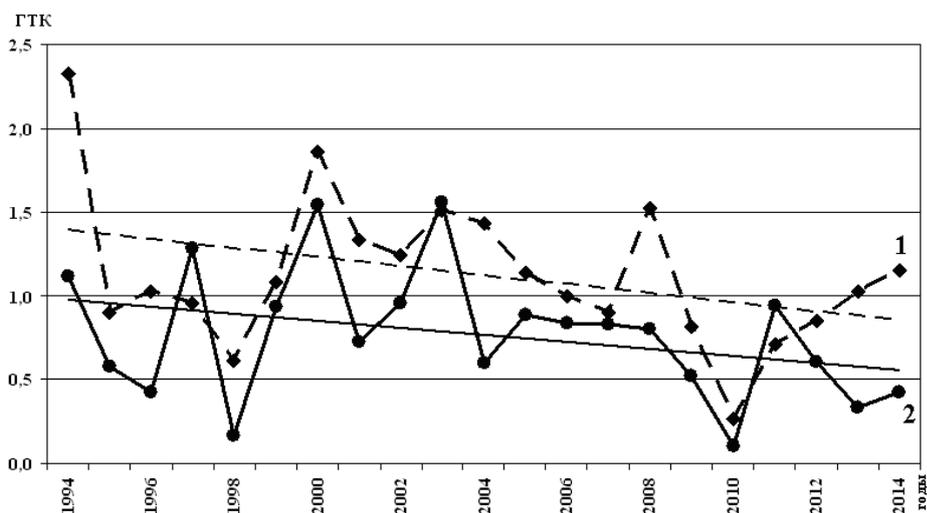


Рис. 5. Динамика гидротермического коэффициента (ГТК) в мае-июне в Пензенской (1) и Оренбургской (2) областях и линии трендов

ность пшеницы (с убранной площади) за этот период (при больших колебаниях в разные годы) в среднем понижалась со скоростью 0,9 ц/га за 10 лет, тогда как в Пензенской, Ульяновской областях, например, от начала к концу периода наблюдался рост урожайности со скоростью около 2,2 ц/га за такой же период.

На наш взгляд, это можно объяснить в основном (кроме различий в культуре земледелия и технологиях возделывания) различными условиями увлажнения этих территорий в весенне-летний период вегетации, что подтверждается результатами анализа построенных за тот же период (1993-2013 гг.) трендов гидротермического коэффициента увлажнения (ГТК) за май-июнь – основной период формирования урожая озимых культур (рис.5).

Можно отметить, что в субъектах Среднего Поволжья в среднем наблюдалось ухудшение условий увлажнения в этот период, однако происходило это с различной интенсивностью в субъектах правобережной и левобережной частях территории Среднего Поволжья. Так, например, в Пензенской области (Правобережье) значение ГТК=1,40 в начале периода, которое характеризует хорошее увлажнение, уменьшилось в среднем к концу периода до 0,90 (удовлетворительное увлажнение). В то же время в Оренбургской области (Левобережье) от увлажнения, близкого к достаточному (ГТК в начале периода =0,98), оно ухудшилось в среднем к концу периода до сильной засухливости (ГТК=0,57). Следует отметить, что в последние годы засухи в левобережных субъектах Среднего Поволжья были значительно интенсивнее, чем в правобережных. Так, например, даже в самую жесткую засуху 2010 г. значения ГТК в мае (наиболее важный период формирования урожая озимой пшеницы) в Оренбургской, Самарской, Саратовской областях составляли от 0,11 до 0,35, тогда как в Пензенской и Ульяновской областях они были 0,44-0,45 (Фролов, Страшная, 2011).

В изменившихся агроклиматических условиях последних десятилетий (ухудшение условий увлажнения) и сокращения полевых агрометеонаблюдений необходимо было разработать новые регрессионные нелинейные модели, связывающие урожайность озимой пшеницы с метеорологическими параметрами и модели, основанные на комплексировании метеорологических параметров с данными спутниковых измерений (NDVI) для прогнозирования средней по субъектам урожайности в конце мая и в конце июня (сроки, принятые в Росгидромете). Была также исследована возможность увеличения заблаговременности таких прогнозов. В исследованиях использовались методы корреляционного и графического анализов, позволившие выявить тесноту связей урожайности пшеницы 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 указанными факторами колебались в основном от 0,39 до 0,68, наиболее тесная корреляция наблюдалась с месячными значениями указанных факторов (r от 0,50 до 0,70). В качестве примеров зависимости урожайности озимой пшеницы от запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы (W_{0-100} , мм) в период возобновления вегетации и от ГТК в мае по Оренбургской области, а также от дефицита влажности воздуха (d , гПа) в мае и NDVI в июне по Республике Татарстан приведены на *рис. 6*.

Были рассчитаны матрицы парных коэффициентов корреляции (за 2003-2013 гг.) между средней по субъектам урожайностью озимой пшеницы и значениями NDVI по декадам вегетации. Анализ этих коэффициентов и построенных на их основе временно – корреляционных функций позволил выявить период наиболее тесных связей урожайности пшеницы со значениями вегетационных индексов по субъектам Среднего Поволжья. В качестве примера такие функции (динамика тесноты связей, или коэффициентов корреляции - r) по Оренбургской области и Республике Татарстан представлены на *рис 7*.

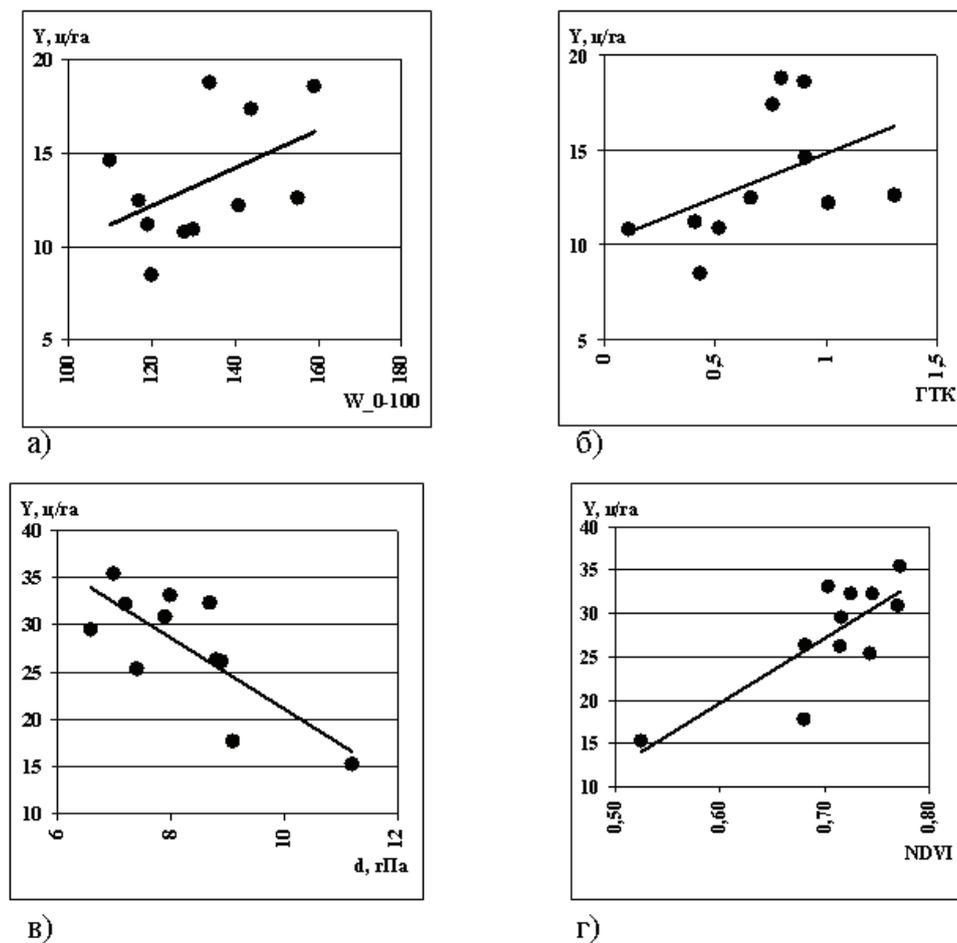


Рис. 6. Связь урожайности (Y , ц/га) озимой пшеницы: (а) с запасами влаги в метровом слое почвы (W_{0-100} , мм) и (б) с ГТК в мае по Оренбургской области; (в) с дефицитом (d , гПа) влажности воздуха в мае и (г) с NDVI в июне по Республике Татарстан

Наиболее тесная связь урожайности озимой пшеницы с NDVI в южных районах Среднего Поволжья (например, Оренбургская область) проявляется в период со второй декады мая по вторую декаду июня, когда по средним многолетним данным у растений происходит закладка и формирование колоса, наблюдается колошение и начинается цветение, то есть в период от выхода в трубку до цветения (r составляет от 0,49 до 0,74). Такая теснота связей позволяет сделать вывод о возможности количественной оценки (прогнозирования урожайности) с использованием только NDVI и в этот период прогнозы урожайности могут быть эффективными. Максимальное значение коэффициента корреляции ($r=0,69-0,74$) приходится в среднем на третью декаду мая – первую декаду июня (за декаду до и декаду после колошения). В этот период, на наш взгляд, в большинстве субъектов Среднего Поволжья возможно прогнозирование урожайности озимой пшеницы на основе простой линейной модели (зависимости средней областной урожайности от значений NDVI) с наибольшей точностью. Линейная модель для прогноза, например, по Самарской области имеет вид: $Y_{\text{оз.п.}} = 51,953\text{NDVI} - 17,611$; $r = 0,80$. В северных районах Среднего Поволжья (например, Татарстан), изменение тесноты связей происходит с похожей закономерностью, но в связи с тем, что практически все фенологические фазы сдви-

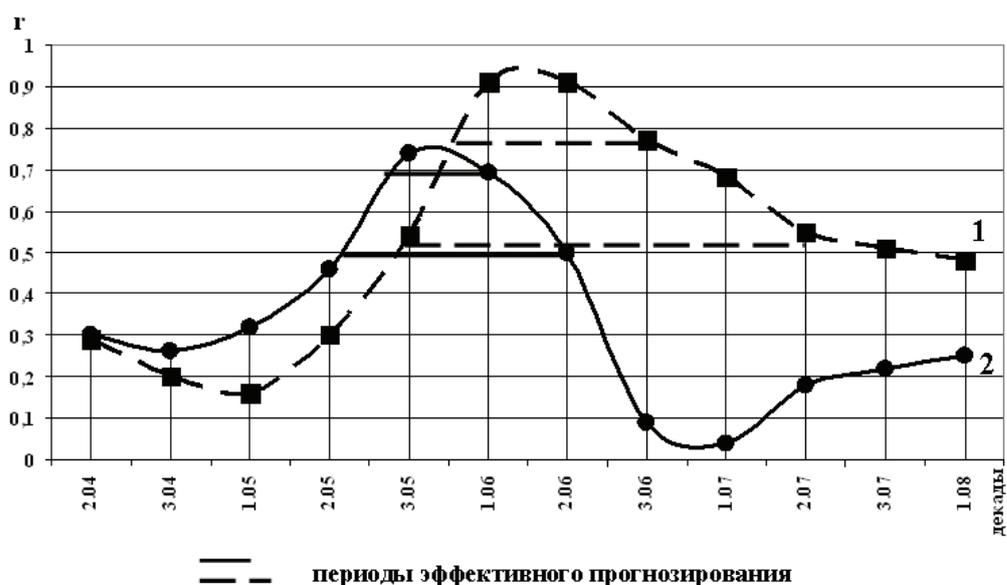


Рис. 7. Связь урожайности озимой пшеницы с NDVI (динамика коэффициентов корреляции, r) за период 2003-2013 гг. по декадам весенне-летней вегетации в Республике Татарстан (1) и Оренбургской области (2)

нуты во времени на более поздние сроки (в среднем на 8-12 дней), максимальное значение коэффициентов корреляции урожайности пшеницы с NDVI ($r=0,71-0,91$) наблюдается в среднем в первой-третьей декадах июня, и прогнозирование урожайности пшеницы в этот период будет наиболее эффективным. Отметим, что в последующем (после цветения) уменьшение значений коэффициентов корреляции в Республике Татарстан происходит медленнее, чем в более засушливой Оренбургской области.

При разработке прогностических моделей для увеличения объемов выборки оказалось целесообразным объединение субъектов в группы, наиболее сходные по агроклиматическим условиям. Кроме того, для этой цели была выполнена стандартная процедура проверки синхронности колебаний отклонений урожайностей от трендов (положительных, отрицательных), обусловленных влиянием погоды конкретных лет по знаковому критерию (или коэффициенту Фехнера), представляющего собой отношение разности количества совпадений (r) и несовпадений отклонений (k) по знаку (+, -) к их сумме: $\Phi = (r-k) : (r+k)$.

В результате были сформированы три группы субъектов, где колебания отклонений урожайности от трендов, хотя и не достигали четкой синхронности (критерий – 80%), но были близкими к синхронным (74-78%). В первую группу вошли Оренбургская, Самарская и Саратовская области, во вторую Ульяновская и Пензенская и в третью – республики Татарстан, Мордовия.

Для прогнозирования урожайности озимой пшеницы в конце мая (основной срок) строились нелинейные регрессионные модели, в которых в качестве параметров были использованы метеорологические факторы (показатели) за май, осредненные по территории субъектов. В общем виде для первой группы субъектов модель, построенная по метеоро-

Таблица 1. Изменчивость урожайности озимой пшеницы (Уоз.п.) относительно линейных трендов за период с 1993 по 2013 гг.

Территория	Коеф. вар. Уоз.п. с посевной площади, (V)	Экстремальные отклонения урожайности с посевной площади				Среднее квадратическое отклонение (δ) Уоз.п. с посевной площади
		Положительные		Отрицательные		
		ц/га	год	ц/га	год	
Оренбургская обл.	0,41	7	1993	11,7	1998	4,83
Саратовская обл.	0,45	7,5	1997	9,3	1995	5,36
Самарская обл.	0,37	4,7	1993	10,0	1998	4,75
Пензенская обл.	0,38	7,8	2013	8,2	2010	4,77
Ульяновская обл.	0,32	6,6	2002	12,1	1998	5,77
Респ. Татарстан	0,37	12,6	2002	21,5	2010	8,43

логическим параметрам, имеет вид: $Y_{оз.п.} = aT_5 + bГТК_5$ (или d_5) + c, а модель, основанная на комплексировании метеорологических и спутниковых данных:

$$Y_{оз.п.} = aT_5 + bГТК_5 \text{ (или } d_5) + sNDVI_5 + c.$$

Множественные коэффициенты корреляции этих моделей колеблются от 0,83 до 0,89.

Приведем конкретную модель, построенную с учетом комплексирования метеорологических и спутниковых данных (регрессионное уравнение) для прогнозирования урожайности озимой пшеницы для второй группы областей (например, для Ульяновской области):

$$Y_{оз.п.} = 3,284ГТК_5 - 2,052d_5 + 37,906NDVI_5 + 9,421; \quad R=0,89.$$

Были также разработаны модели для прогнозирования урожайности озимой пшеницы в июне. В этих моделях в качестве параметров использовались те же факторы, что и в моделях для прогноза урожайности в мае, но рассчитанные в среднем по субъектам за июнь. Множественные коэффициенты корреляции в этих моделях были меньшими, чем для мая, так как в июне у озимой пшеницы в Среднем Поволжье обычно уже наблюдается налив зерна и идет созревание; при этом влияние метеорологических факторов на урожайность уменьшается.

С учетом запросов потребителей агрометеорологической информации для увеличения заблаговременности составления прогноза урожайности озимой пшеницы были построены прогностические модели, где в качестве основных параметров были использованы запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы (W_{0-100} , мм) в период после возобновления вегетации и вегетационный индекс NDVI. По данным исследований (Уланова, 1975) ресурсы влаги в почве весной в черноземной зоне России в значительной степени определяют будущий урожай озимых культур. Наши исследования выявили, что наибольшая теснота связей урожайности озимой пшеницы наблюдается с запасами продуктивной влаги, осредненными по субъекту за третью декаду апреля ($W_{0-100,4-3}$), после возобновления вегетации (r колеблется от 0,46 до 0,62). Связь NDVI за эту декаду с урожайностью проявляется несколько слабее, однако использование для построения модели этого параметра в комплексе с запасами влаги показало вполне удовлетворительные результаты. Общий вид модели для южных районов Среднего

Поволжья (первой и второй групп областей) следующий: $Y_{\text{оз.п}} = aW_{0-100,4-3} + bNDVI_{4-3} + c$. В более северных районах, например, по Республике Татарстан, где вегетация озимых культур возобновляется позже, использовались параметры, рассчитанные за первую декаду мая.

Прогноз урожайности озимой пшеницы в конце мая является основным, используемые метеопараметры и NDVI за май имеют наибольшую тесноту связей с урожайностью. На конец мая – начало июня приходится средняя многолетняя дата колошения озимой пшеницы в большинстве субъектов. Как указывалось выше, в этот период величины NDVI и $k \cdot h$ приближаются к максимальным значениям, в связи с чем точность прогнозирования урожайности, как показала проверка метода по материалам 2013 г. (при его исключении из обработки) увеличивается. Следует отметить, что все метеорологические параметры, входящие в модели, в автоматизированном режиме рассчитываются по данным декадных агрометтелеграмм, содержащим фактические данные наблюдений гидрометстанций Росгидромета и поступающим в Гидрометцентр России по коду КН-21. Общий вид таких телеграмм (сообщений) приведен в работе (Пурина и др., 2011). При этом для расчета метеорологических параметров используются прикладные статистические программы, имеющиеся на рабочих местах прогнозиста-агрометеоролога в локальной вычислительной сети Гидрометцентра – PROMETEI (Пурина и др., 2011). Текущие значения NDVI берутся с сервиса ВЕГА.

Ошибки прогнозов, составленных в конце мая с учетом комплексирования наземных и спутниковых данных в среднем были меньше (на 3-9%), чем ошибки прогнозов, составленных только по метеорологическим данным. Средняя ошибка прогнозов, составленных по моделям с учетом комплексирования метеорологических и спутниковых данных в апреле, составляла от 17 до 30%, а прогнозов, составленных в конце мая, – 13,0-16,5%. Ошибка прогнозов, составленных в конце июня, была существенно больше и составляла в среднем от 23 до 37%, т.е. эти прогнозы были менее успешными.

Рассмотренные подходы к прогнозированию урожайности озимой пшеницы, основанные на комплексировании наземных наблюдений и спутниковых данных, на наш взгляд, могут быть использованы на преобладающей территории Черноземной зоны России, где площади полей большие и озимые культуры хорошо детектируются в связи с ранним возобновлением активной вегетации весной, в то время, когда яровые зерновые культуры только высеваются. Наши предварительные исследования по территории центральных черноземных областей показали возможность использования этого подхода и для прогнозирования урожайности всех зерновых и зернобобовых культур в целом.

Литература

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. *Клеценко 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., Барталев С.А., Савин И.Ю. Технология спутникового мониторинга в сельском хозяйстве России // Аэрокосмический курьер. 2009. № 6. С. 47-49.
6. Лупян Е.А., Барталев С.А., Толпин В.А., Жарко В.О., Крашенинникова Ю.С., Оксюкевич А.Ю. Использование спутникового сервиса «Вега» в региональных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 215-232.
7. 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.
8. Моисейчик В.А. Агрометеорологические условия и перезимовка озимых культур. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 294 с.
9. Мурынин А.Б., Бондур В.Г., Игнатьев В.Ю., Гороховский К.Ю. Прогнозирование урожайности на основе многолетних космических наблюдений за динамикой развития вегетации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 245-256.
10. 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.
11. Савин И.Ю., Лупян Е.А., Барталев С.А. Оперативный спутниковый мониторинг состояния посевов сельскохозяйственных культур России. // GEOMATICS. № 2. 2011. С. 69-76.
12. Синицина И.И., Гольцберг И.А., Струнников З.А. Агроклиматология // Л.: Гидрометеиздат, 1973. 344 с.
13. 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.
14. 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.
15. Толпин В.А., Барталев С.А., Бурцев М.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Прошин А.А., Флитман Е.В. Оценка состояния сельскохозяйственных культур на основе межгодовой динамики с использованием данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2007. Выпуск 4. Т. II. С. 380-389.
16. Толпин В.А., Лупян Е.А., Барталев С.А., Плотников Д.Е., Матвеев А.М. Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «Вега» // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7 (306). С. 581-586.
17. Уланова Е.С. Агрометеорологические условия и урожайность озимой пшеницы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 301 с.
18. Фролов А.В., Страшная А.И. О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур. Сборник докладов // ГУ «Гидрометцентр России» М.: ТРИАДА ЛТД, 2011. 72 с.

On the possibility to predict the yield of winter wheat in the Middle Volga region on the basis of integration of land and satellite data

O.V. Bereza ¹, A.I. Strashnaya ¹, E.A. Loupian ²

¹Hydrometeorological Research Centre of Russian Federation, Moscow 123242, Russia

E-mail: ais@mecom.ru

²Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: evgeny@smis.iki.rssi.ru

The dynamics of NDVI value (Normalized Difference Vegetation Index) in dry years and in years with sufficient moisture of the Middle Volga region has been investigated. Dependencies of winter wheat productivity on meteorological factors are established. Based on the established relationship between winter wheat productivity and NDVI, the average long-term dynamics of the correlation coefficients between NDVI and the yield of wheat is presented for 2003-2013 by decades of the spring-summer vegetation period. The periods when forecasting of productivity is possible with the greatest accuracy are determined. Regression physical-statistical models are developed aimed at forecasting the average winter wheat productivity for various regions in agrometeorological conditions that have undergone marked changes over the past decades, based on meteorological factors and models that integrate terrestrial and satellite data. The forecast interval grew by one month.

Keywords: crop yield forecasting; winter wheat; NDVI; agrometeorological conditions; regression models.

References

1. Bartalev S.A., Loupian E.A., Neyshtadt I.A., Savin I. Yu., Klassifikatsiya nekotorykh tipov sel'skokhozyaistvennykh posevov v yuzhnykh regionakh Rossii po sputnikovym dannym MODIS (Gropland Area Classification in South Regions of Russia Using MODIS Satellite Data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 3, pp. 68-75.
2. Bartalev S.A., Loupian E.A., Neyshtadt I.A., Savin I. Yu., Distsionnaya otsenka parametrov sel'skokhozyaistvennykh zemel' po sputnikovym dannym spektrometra Modis (Remote assessment of farmlands with the MODIS spectroradiometer satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Vol. 2, No. 2, pp. 228-236.
3. Kleshchenko A.D., Agrometeorologicheskoe i agroklimaticheskoe obespechenie agrarnogo sektora ekonomiki Rossii (Agrometeorological and agroclimatic support of the rural sector of Russia), *Trudy VNIISKhM* (Proceedings of ARRIAM), 2010, Issue 37, pp. 5-21.
4. Koshkin E.I., *Fiziologiya ustoichivosti sel'skokhozyaistvennykh kul'tur* (Sustainability physiology of crops), Moscow: Drofa, 2010, 638 p.
5. Loupian E.A., Bartalev S.A., Savin I. Yu., Tekhnologiya sputnikovogo monitoringa v sel'skom khozyaistve Rossii (Satellite monitoring technology in Russian agriculture), *Aerokosmicheskii kur'er*, 2009, No. 6, pp. 47-49.
6. Loupian E.A., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Zharko V.O., Krashennikova Yu.S., Oksyukevich A. Yu., Ispol'zovanie sputnikovogo servisa «Vega» v regional'nykh sistemakh distantsionnogo monitoringa (VEGA satellite service applications in regional remote monitoring systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 215-232.
7. Loupian E.A., Savin I. Yu., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Balashov I.V., Plotnikov D.E., Sputnikovyi servis monitoringa sostoyaniya rastitel'nosti («Vega») (Satellite Service for Vegetation Monitoring VEGA), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 190-198.
8. Moiseichik V.A., *Agrometeorologicheskie usloviya i perezimovka ozimyykh kul'tur* (Agrometeorological conditions and overwinter of winter crops), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975, 294 p.
9. Murynin A.B., Bondur V.G., Ignatyev V. Yu., Gorokhovskii K. Yu., Prognozirovanie urozhainosti na osnove mnogoletnikh kosmicheskikh nablyudenii za dinamikoi razvitiya vegetatsii (Yield forecasting on the basis of long-term space-based observations of the dynamics of vegetation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 245-256.
10. Purina I.E., Strashnaya A.I., Chekulaeva T.S., Ignatova N.S., Tekhnologiya obrabotki i dovedeniya konechnoi agrometinformatsii do potrebitel'ei v Gidromettsentre Rossii i operativno-proizvodstvennykh uchrezhdeniyakh Rosgidrometa v programmnom komplekse PROMETEI (Technology of agrometeorological data processing and distribution with the PROMETEI software within the Hydrometeorological centre of Russia and Roshydromet production facilities), *Trudy Gidromettsentra Rossii*, (Proceedings of The Hydrometeorological Center of Russia), 2011, Issue 346, pp. 103-120.
11. Savin I. Yu., Loupian E.A., Bartalev S.A., Operativnyi sputnikovyi monitoring sostoyaniya posevov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur Rossii (Near-real time satellite monitoring of crops in Russia), *GEOMATICS*, No. 2, 2011, pp. 69-76.
12. Sinitsina I.I., Goltsberg I.A., Strunnikov Z.A., *Agroklimatologiya* (Agroclimatology), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973, 344 p.
13. Strashnaya A.I., Bartalev S.A., Maksimenkova T.A., Chub O.V., Tolpin V.A., Plotnikov D.E., Bogomolova N.A., Agrometeorologicheskaya otsenka sostoyaniya ozimyykh zernovykh kul'tur v period prekrashcheniya vegetatsii s ispol'zovaniem nazemnykh i sputnikovyykh dannyykh na primere Privolzhskogo federal'nogo okruga (Agrometeorological estimation of winter crops conditions during nongrowing season with ground and satellite data for the Privolzhskiy federal region), *Trudy Gidromettsentra Rossii* (Proceedings of The Hydrometeorological Center of Russia), 2014, Issue 351, pp. 85-105.
14. Strashnaya A.I., Maksimenkova T.A., Chub O.V., O srokakh seva ozimyykh kul'tur v usloviyakh izmeneniya klimata i ikh prognozirovanie v Privolzhskom federal'nom okruge (Seeding times of winter crops under the conditions of climate change and their forecast in the Privolzhskiy federal region), *Trudy Gidromettsentra Rossii* (Proceedings of The Hydrometeorological Center of Russia), 2011, Issue 345, pp. 175-193.
15. Tolpin V.A., Bartalev S.A., Burtsev M.A., Efremov V. Yu., Loupian E.A., Mazurov A.A., Matveev A.M., Proshin A.A., Flitman E.V., Otsenka sostoyaniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur na osnove mezhdodovoi dinamiki s ispol'zovaniem dannyykh MODIS (Interannual dynamics based estimation of crops conditions by MODIS data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, Issue 4, No. 2, pp. 380-389.
16. Tolpin V.A., Loupian E.A., Bartalev S.A., Plotnikov D.E., Matveev A.M., Vozmozhnosti analiza sostoyaniya sel'skokhozyaistvennoi rastitel'nosti s ispol'zovaniem sputnikovogo servisa «Vega» (Agricultural crops analysis abilities with the VEGA satellite service), *Optika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 27, No.7 (306), pp. 581-586.
17. Ulanova E.S., *Agrometeorologicheskie usloviya i urozhainost' ozimoi pshenitsy* (Agrometeorological conditions and winter wheat productivity), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975, 301 p.
18. Frolov A.V., Strashnaya A.I., O zasukhe 2010 goda i ee vliyaniy na urozhainost' zernovykh kul'tur. Sbornik dokladov (Drought of 2010 and its influence on small grains productivity), *GU «Gidromettsentr Rossii»* (The Hydrometeorological Center of Russia), Moscow: TRIADA LTD, 2011, 72 p.