

АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОЗИМЫХ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В ПЕРИОД ПРЕКРАЩЕНИЯ ВЕГЕТАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ ПРИВОЛЖСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

*А.И. Страшная¹, С.А. Барталев², Т.А. Максименкова¹, О.В. Чуб¹, В.А. Толпин²,
Д.Е. Плотников², Н.А. Богомолова¹*

¹*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации*

²*Институт космических исследований Российской академии наук*

ais@mecom.ru, <mailto:bartalev@d902.iki.rssi.ru>, <mailto:dmitplot@d902.iki.rssi.ru>

Анализ проблемы

Приволжский федеральный округ является крупным производителем зерна в Российской Федерации. В благоприятные по агрометеорологическим условиям годы (например в 2002 и 2008 гг.) валовой сбор зерновых и зернобобовых культур в округе достигал 25–27 млн т (26–28 % от общего валового сбора данных культур в стране), не уступая Южному федеральному округу, где агроклиматические условия в целом более благоприятны для возделывания этих культур [14]. В зерновом балансе округа значительный вес принадлежит озимым зерновым культурам, которые дают порядка 35–36 % валового сбора зерна, производимого в округе. На преобладающей территории округа озимая пшеница, например, занимающая в округе большие площади (до 2,5 млн га), является «страховой» культурой, так как её урожайность практически во все годы превосходит урожайность яровой пшеницы. В связи с более ранним началом вегетации озимых весной, они лучше используют накопленные к весне запасы продуктивной влаги в почве и часто «уходят» от засухи, нередко случающейся в южной половине округа, или же менее резко реагируют на нее. Однако в годы, неблагоприятные по условиям зимовки, когда наблюдаются повреждения и гибель растений, валовой сбор озимых значительно снижается. Так, из-за неблагоприятных агрометеорологических условий в зиму 2005/2006 гг. (гибель озимых весной составила 36 % от их посевной площади) валовой сбор озимых в 2006 г. в округе составил лишь 5,4 млн т, тогда как в 2009 г., когда в зиму 2008/2009 гг. условия были в основном благоприятными, 9,9 млн т.

Исследования, проведенные нами за последние 22 года, показали, что во многих районах округа гибель озимых к весне на значительных площадях происходила не только из-

за неблагоприятных условий зимнего периода, особенно при резких похолоданиях при небольшом снежном покрове, но и вследствие неблагоприятных агрометеорологических условий осеннего периода. В Приволжском федеральном округе наибольшие площади с плохим состоянием озимых осенью наблюдались в 1996, 2005 и 2010 гг. Так, например, из-за засухи осенью 2005 г., наблюдавшейся в субъектах южной половины округа, их площадь на дату прекращения вегетации составляла 14 % от их общей посевной площади в округе, а осенью 2010 г. – 16 % (рис. 1). Весной 2006 и 2011 г. площадь озимых в плохом состоянии озимых в округе составляла, соответственно, 36,6 и 19,7 %.

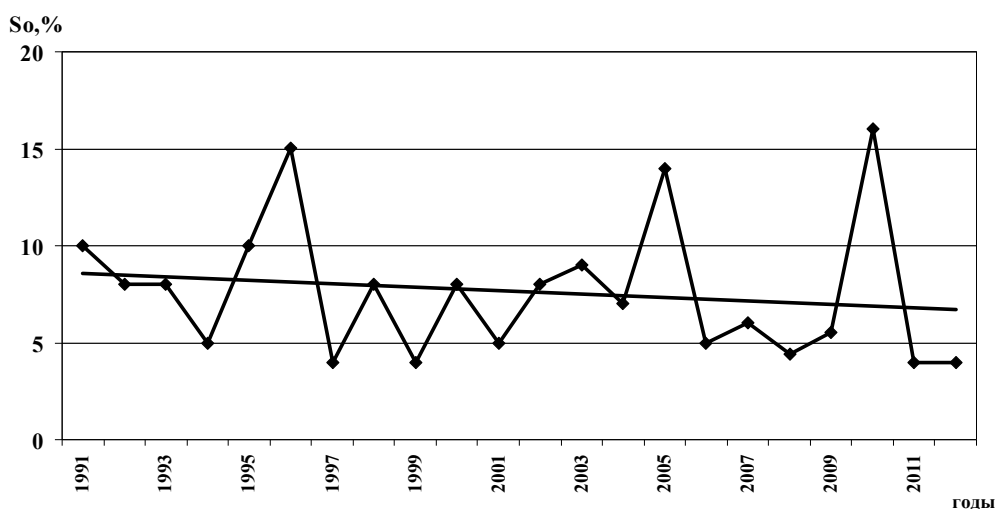


Рис. 1. Динамика площадей озимых зерновых культур в плохом состоянии осенью (S_0 , %) в Приволжском федеральном округе (1991–2012 гг.).

Проведенный анализ показывает, что при засушливых условиях осенью во многих южных субъектах округа площадь озимых в плохом состоянии после прекращения вегетации в отдельные годы составляла 30–50 % и более от площади плохих посевов озимых весной. Так, весной 2006 г. в Самарской области площадь озимых культур в плохом состоянии составила 32,7 % от их общей посевной площади в субъекте, а осенью 2005 г. – 18 %, т.е. почти 55 % от площади в плохом состоянии посевов весной. В Оренбургской области площадь озимых в плохом состоянии весной 2006 г. составляла 47,7 %, из них на 16 % площадей плохое состояние озимых было уже осенью 2005 г. Приведенные данные указывают на важность и необходимость мониторинга состояния озимых осенью. Такой мониторинг особенно необходим для учета площадей с плохим состоянием посевов осенью в прогнозах ожидаемого состояния озимых культур весной [11] и в дальнейшем при прогнозировании валовых сборов этих культур.

В [3, 4, 9–11, 16–18] показано, что успешно зимуют озимые, хорошо раскустившиеся (до 3–4 побегов) осенью, с равномерной густотой стеблестоя, а чаще всего зимой погибают

слаборазвитые и изреженные посевы. Известно также, что весной кущение озимых нередко ограничено, что в свою очередь ведет к снижению количества колосоносных стеблей и, следовательно, к снижению урожая. Таким образом, состояние озимых культур осенью ко времени прекращения вегетации является не только важным показателем успешной (или неуспешной) зимовки, но в определенной степени – показателем уровня их ожидаемой урожайности.

В исследованиях, проведенных Е.С. Улановой, А.Я. Грудевой, Т.А. Максименковой, А.И. Страшной и др., показано, что основными факторами, определяющими состояние зимующих культур осенью ко времени прекращения вегетации на конкретных полях, являются температурные условия и влагообеспеченность растений. В 70-е годы прошлого века в Гидрометцентре России Т.А. Максименковой [9, 10] были разработаны методы прогнозов площадей в плохом состоянии озимых культур ко времени прекращения вегетации, где в качестве предикторов в регрессионных уравнениях использовались показатели условий тепло- и влагообеспеченности. Однако в связи с сокращением наблюдений на сети гидрометстанций, произошедшим в начале девяностых годов, а также с изменением агроклиматических условий за последние 30 лет, оправдываемость прогнозов данными методами снизилась. Как показано в [17], изменение агроклиматических условий в Приволжском федеральном округе было весьма значительным. При этом в период осенней вегетации озимых тренды температуры воздуха за период с 1980 по 2009 г. практически во всех субъектах округа оказались положительными и хорошо выраженными. В то же время по условиям увлажнения были выявлены значительные различия. Так, на севере округа и практически во всех заволжских районах количество осадков в сентябре в среднем уменьшалось, тогда как на юго-западе округа – несколько увеличивалось. За последнее десятилетие наиболее существенное ухудшение условий увлажнения в осенний период наблюдалось в 2005 и 2010 гг. в Саратовской и Оренбургской областях. За наиболее важный период появления всходов и роста озимых (третья декада августа – вторая декада сентября) количество осадков составляло в основном 20–60 % нормы и наблюдалась почвенная засуха (средние по субъекту запасы продуктивной влаги в почве составляли 5–9 мм). Почти аналогичная ситуация наблюдалась в Самарской области. Примером может служить динамика запасов влаги в пахотном слое почвы (W_{0-20}) и площадей озимых (S_0 , %) в плохом состоянии осенью по Саратовской области (рис. 2), где хорошо видно, что в годы с низким влагозапасом в почве площади с плохим состоянием озимых осенью существенно увеличивались.

С середины девяностых годов прошлого века в Гидрометцентре России для оперативных докладов в органы власти и управления АПК о состоянии озимых культур ко

времени прекращения вегетации используются не только данные наблюдений гидрометстанций, результаты маршрутных обследований и расчетные данные с учетом температуры воздуха и запасов влаги в почве, но по отдельным территориям (Центрально-Чернозёмные области, территории деятельности Северо-Кавказского и Приволжского УГМС) использовались и данные спутниковых наблюдений, представляемые «ВНИИСХМ» [5]. Однако уменьшение количества пунктов наблюдений, трудности с транспортом для проведения наземных обследований озимых после прекращения вегетации [15], а также фрагментарность спутниковой информации в отдельные периоды (из-за наличия облачности и других помех) вызывают необходимость поиска и использования таких способов наблюдений за посевами озимых для оценки их состояния, которые были бы достаточно надежны, однородны и выполнялись на регулярной основе с четкой периодичностью не только по отдельным территориям, но и по всем сельскохозяйственным районам РФ.

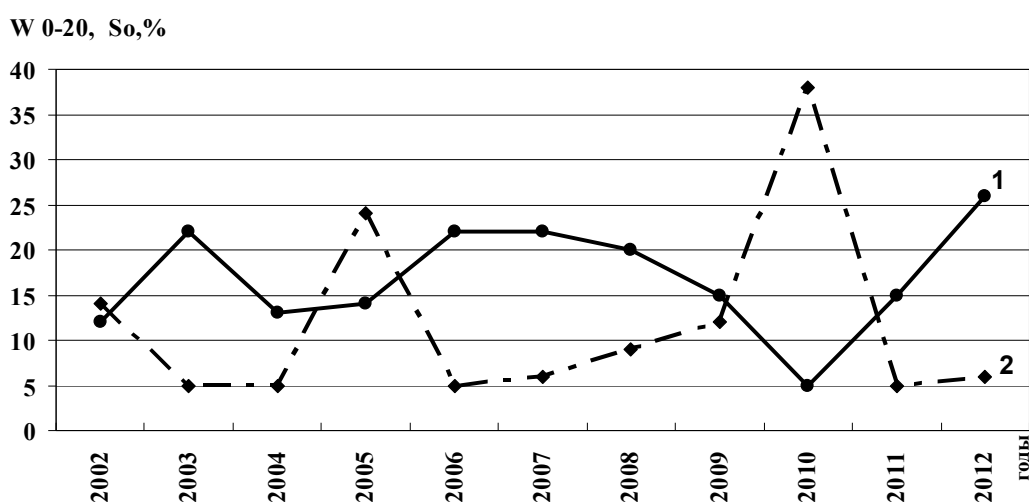


Рис. 2. Динамика запасов продуктивной влаги (1) в пахотном слое почвы (W_{0-20}) и площадей озимых зерновых культур (2) в плохом состоянии осенью (S_0 , %) по Саратовской области за 2002–2012 гг.

Возможности оценки состояния озимых культур с использованием сервиса спутникового мониторинга растительности ВЕГА

В ряде исследований [1, 2, 7, 8, 12, 13] показано, что использование данных дистанционного зондирования Земли со спутников позволяет существенно повысить эффективность решения задач оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур. В частности, ассимиляция спутниковых данных в существующие прогнозные модели развития сельскохозяйственных растений позволяет создавать новые методы оценки их состояния, что подтверждается, в том числе, и опытом Росгидромета [6].

Современный уровень технологий спутникового мониторинга позволяет получать оперативную объективную информацию о сельскохозяйственных угодьях по всей территории России. При этом данные о состоянии и развитии сельскохозяйственных культур обладают высокими уровнями регулярности и пространственно-временной однородности, что обеспечивает их сопоставимость в различные годы и по различным регионам. Наличие автоматических методов сбора и обработки спутниковых данных позволяет получать оценки интегральных показателей состояния и развития сельскохозяйственных культур в масштабах страны, а также обеспечивает высокий уровень объективности получаемой информации.

Указанные выше технологические предпосылки сформировали основу для разработки принципиально новых информационных систем дистанционного мониторинга. К такого рода системам относится, в частности, разработанный ИКИ РАН специализированный спутниковый веб-сервис ВЕГА (<http://pro-vega.ru/>), обеспечивающий оперативный мониторинг состояния растительного покрова на территории России и стран ближнего зарубежья.

Начатые в 2013 году совместные исследования Гидрометцентром России и ИКИ РАН направлены, в частности, на оценку потенциальных возможностей оценки состояния озимых культур осенью ко времени прекращения вегетации на основе комплексирования данных наземных агрометеорологических наблюдений Росгидромета и спутниковой информации, доступной в составе сервиса ВЕГА. Настоящая статья посвящена рассмотрению полученных к настоящему времени первых результатов проводимых экспериментальных исследований на примере Приволжского федерального округа, в том числе с использованием накопленных исторических (архивных) данных, с 2003 года.

Информационной основой сервиса ВЕГА в настоящее время являются общедоступные данные спутниковых систем дистанционного зондирования Terra/Aqua-MODIS и Landsat-TM/ETM+. При этом сервис ВЕГА предоставляет пользователям централизованный доступ к непрерывно обновляемому архиву спутниковых данных (объемом более двенадцати лет, с 2003 г.) и получаемым на их основе информационным продуктам, включая:

- прошедшие глубокую предварительную обработку (привязка, атмосферная коррекция, фильтрация облачности, формирование композитных изображений и пр.) спутниковые данные;
- полученные на основе спутниковых данных информационные продукты для анализа состояния растительности (вегетационные индексы NDVI, PVI, и пр.);
- регулярно обновляемые на основе спутниковых данных тематические информационные продукты, характеризующие типы растительного покрова (включая классы

сельскохозяйственной растительности) и его состояние, определяемое текущим значением вегетационного индекса в сравнении с его многолетней нормой.

В основу алгоритма детектирования посевов озимых положен анализ временных рядов перпендикулярного вегетационного индекса PVI, значения которого рассчитываются с использованием четырехдневных композитных изображений MODIS [13]. Одним из наиболее информативных признаков для выявления посевов озимых является характерный рост зеленой биомассы в конце года, тогда как для большинства других типов растительности свойственно её снижение. Анализ динамики происходит с учетом полученной по данным MODIS и ежегодно актуализируемой карты используемых пахотных земель [2]. Карты посевов озимых обновляются несколько раз в сезон вплоть до выпадения снега для отражения текущей ситуации во всей зоне мониторинга (рис. 3).

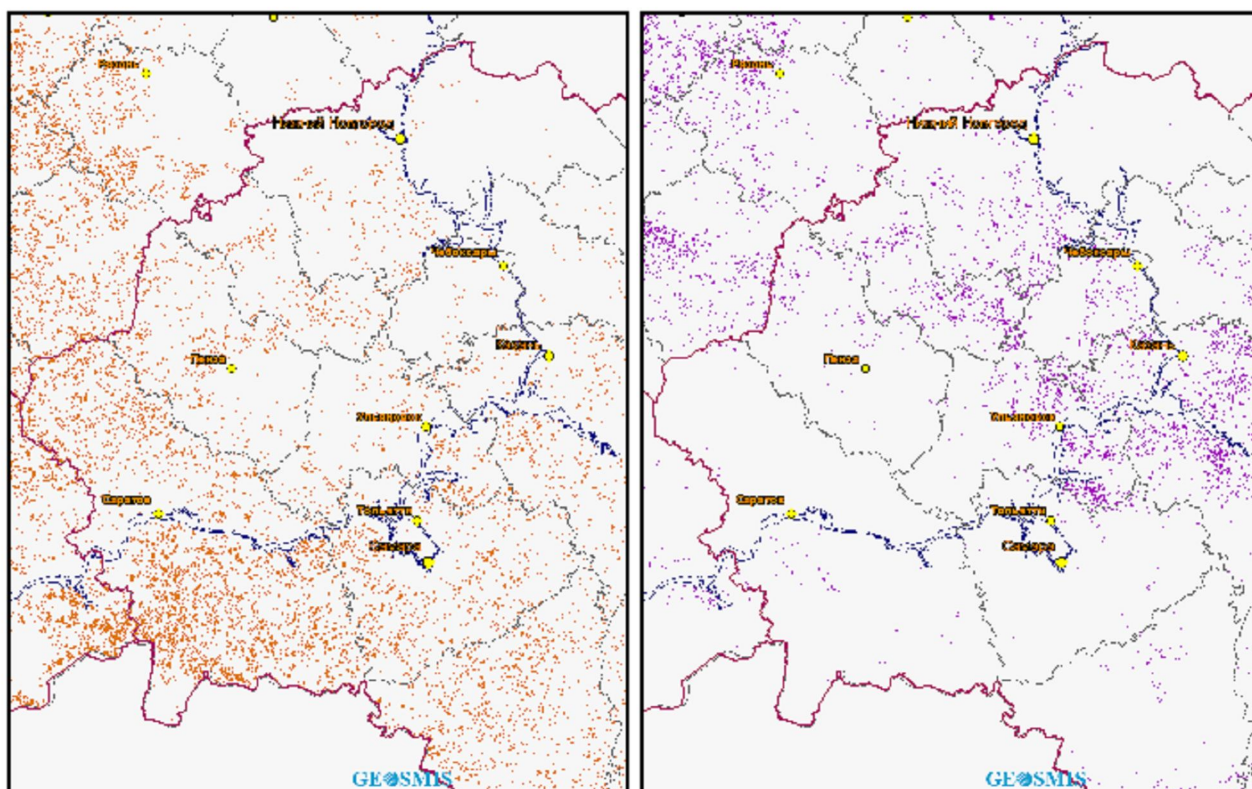


Рис. 3. Примеры выявленных по спутниковым данным посевов озимых культур осенью в конце вегетации в Приволжском федеральном округе при благоприятных (сезон 2011–2012 гг., слева.) и неблагоприятных (сезон 2010–2011 гг., справа) условиях развития посевов.

Для качественной оценки состояния всходов озимых культур в системе ВЕГА используется анализ текущей локальной динамики вегетационного индекса, соответствующего полям озимых, в сравнении со средней многолетней динамикой. В качестве информативного вегетационного индекса используется нормализованный разностный индекс растительности NDVI, получаемый регулярно по неделям вегетации.

NDVI рассчитывается как отношение разности коэффициентов спектральной яркости ρ в ближнем ИК (NIR) и красном (red) диапазонах к их сумме согласно формуле:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (1)$$

Реализованный в системе ВЕГА метод оценки состояния озимых [8] основан на использовании многолетних рядов данных MODIS и включает в себя следующие шаги:

(I) создание и ежегодное обновление многолетних (начиная с 2001 г. по настоящее время) карт всходов озимых культур;

(II) пространственное (в пределах административного района) осреднение временных профилей NDVI по карте всходов озимых культур;

(III) построение среднемноголетних временных профилей NDVI озимых культур;

(IV) оперативная оценка отклонений текущих профилей NDVI озимых культур от их среднемноголетних временных профилей на уровне административных районов.

На основании этих данных строится карта состояния озимых по данным на текущий момент (на момент окончания вегетации осенью). На рис. 4 приведен пример карты на конец вегетации озимых осенью 2013 г. в Приволжском федеральном округе. Оценка состояния посевов дается в градациях: близко к средней, лучше средней, хуже средней.

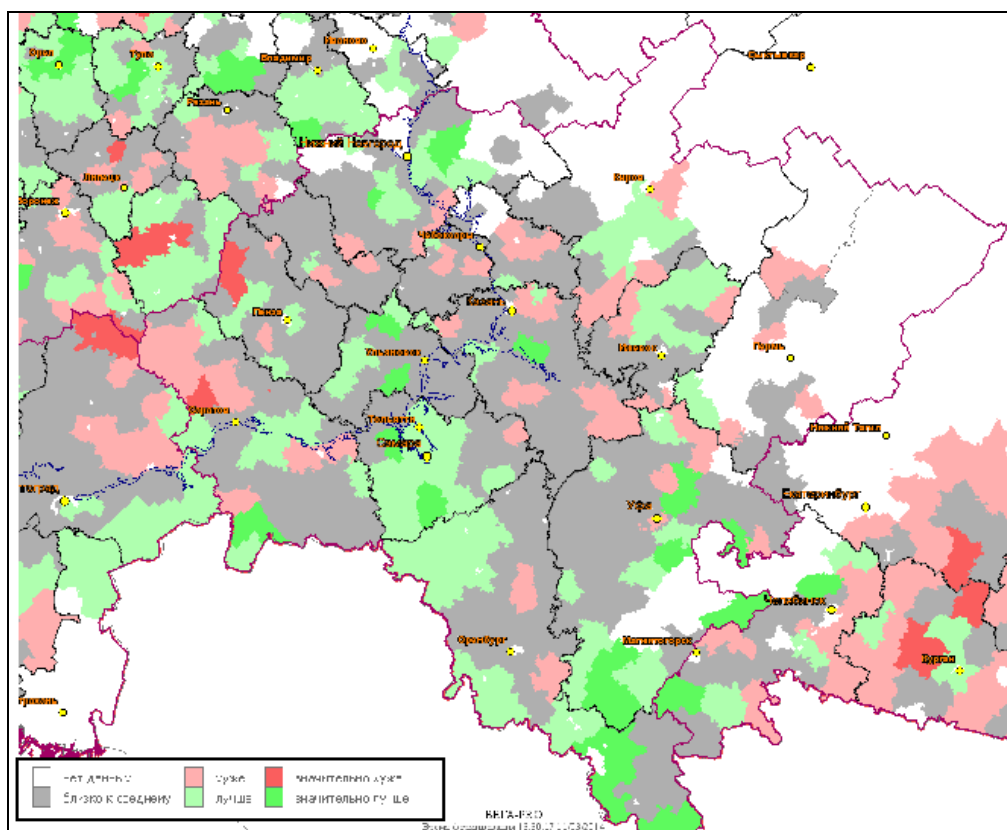


Рис. 4. Состояние озимых культур по спутниковым данным на конец вегетации озимых осенью 2013 г. в Приволжском федеральном округе.

Отдел агрометеорологических прогнозов Гидрометцентра России начал активно пользоваться сервисом ВЕГА с ноября 2012 г., используя его для анализа оперативных и исторических данных о динамике NDVI для оценки состояния сельскохозяйственных культур.

Экспериментальные исследования по оценке состояния озимых культур

Экспериментальные исследования по оценке состояния озимых культур проведены на примере Приволжского федерального округа с использованием созданного многолетнего архива спутниковых и наземных данных, охватывающего период 2003–2012 гг., который включает в себя ежегодные агрометеорологические данные за период август-октябрь по декадам вегетации и, максимально приближенные к ним по времени, значения NDVI. На основе полученных данных для входящих в Приволжский федеральный округ субъектов Российской Федерации были рассчитаны интегральные значения NDVI озимых культур и площади их посевов с плохим состоянием осенью (S_0).

На начальном этапе были проанализированы «исторические» данные о динамике индекса NDVI в период осенней вегетации озимых культур по ряду субъектов округа в годы, когда увлажнение территорий было достаточным (2011 и 2012 гг.), и в годы, когда наблюдалась засуха (2010 г.). Значения NDVI в эти годы существенно различались. По Саратовской области, например, динамика NDVI за эти годы показана на рис. 5, где можно видеть, что в засушливую осень 2010 г. значение индекса в течение всего рассмотренного осеннего периода было значительно ниже, чем осенью 2011 и 2012 гг., когда увлажнение было достаточным. Особенно низкий уровень NDVI (0,23) проявлялся в период появления всходов озимых (при поздних сроках сева) и в начале вегетации (с конца августа по 21 сентября 2010 г.), тогда как при достаточном увлажнении (в 2011 и 2012 гг.) значение индекса было 0,32–0,38, а в конце вегетации – 0,50–0,60. При улучшении условий увлажнения в начале октября значения индекса существенно возросли. Значительная разница значений индекса во влажные и засушливые годы наблюдалась по большинству субъектов округа.

Исследовалась также сопряженность наземных данных пунктов наблюдений (гидрометстанций Росгидромета) с максимально приближенными к ним в пространственном и временном отношении измерениям NDVI по спутниковым данным на посевах озимых культур. С этой целью строились графики динамики NDVI и основных агрометеорологических параметров по декадам вегетации: количества осадков (P , мм), температуры воздуха (T , °C), запасов продуктивной влаги в пахотном слое почвы (W_{0-20} , мм)

и показателя растительной массы озимых, выраженного нами произведением кустистости на высоту растений ($k \cdot h$). Была выявлена вполне удовлетворительная согласованность динамики этих показателей на преобладающей территории округа. При этом наиболее четко она проявлялась в годы, когда осень была засушливой. В качестве примера такие графики (динамики W_{0-20} , ($k \cdot h$) и NDVI) приведены по Оренбургской области и Республике Татарстан за 2010 и 2012 гг. (рис. 6).

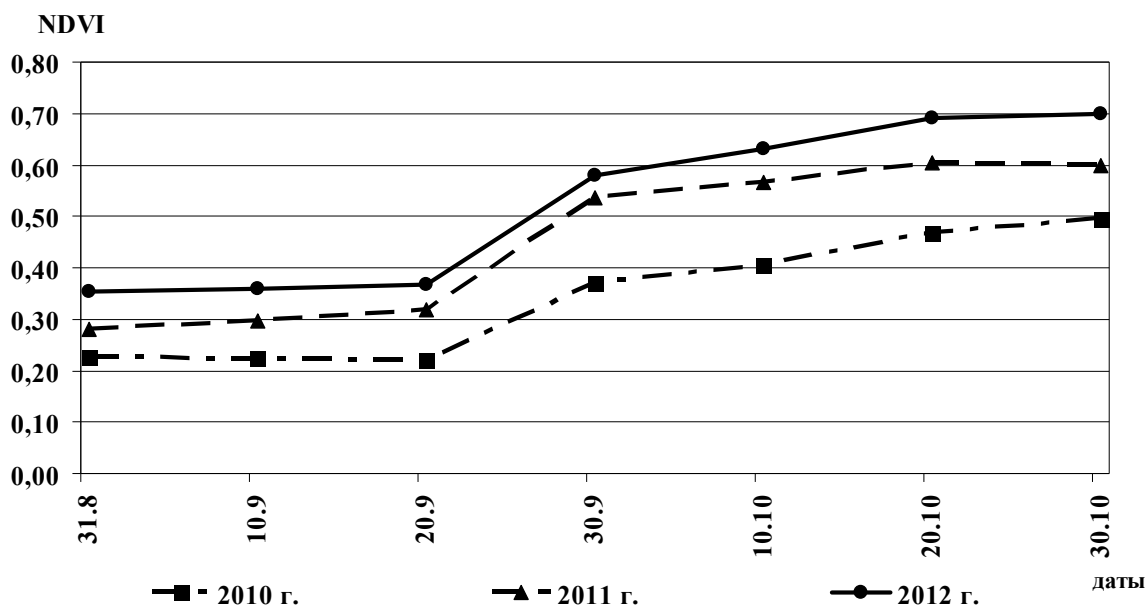
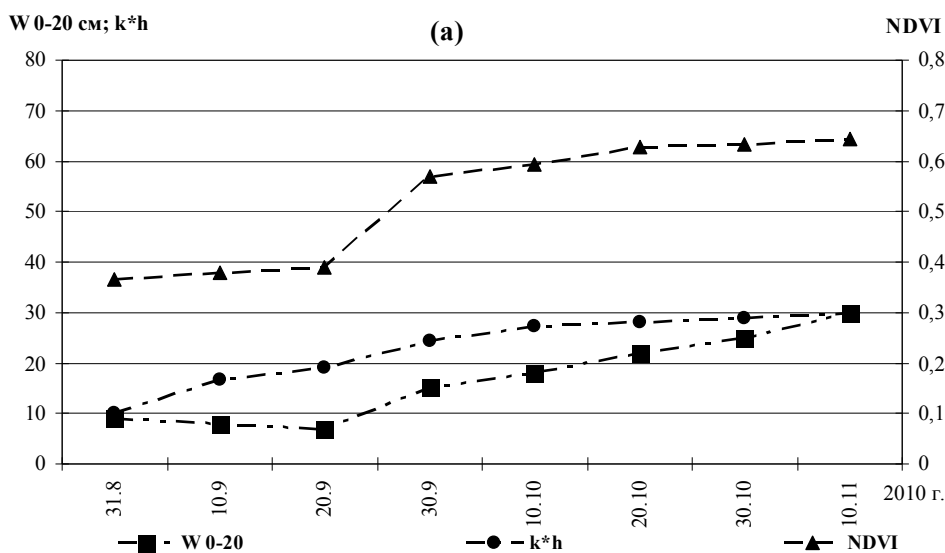


Рис. 5. Динамика NDVI по Саратовской области за 2010–2012 гг.



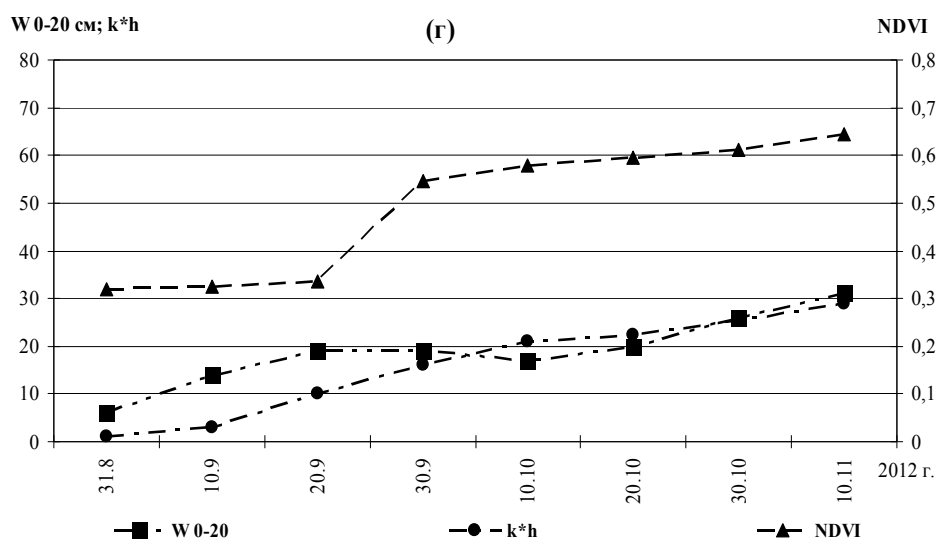
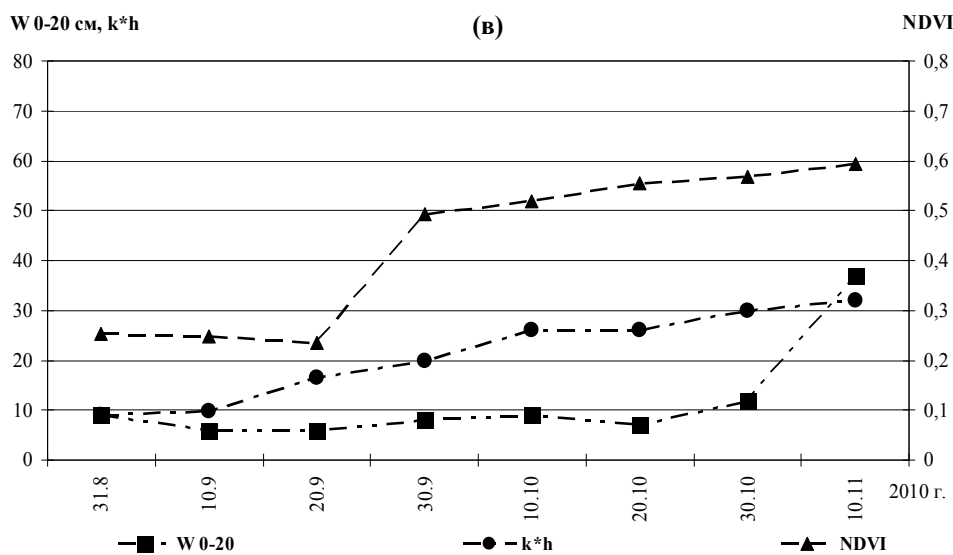
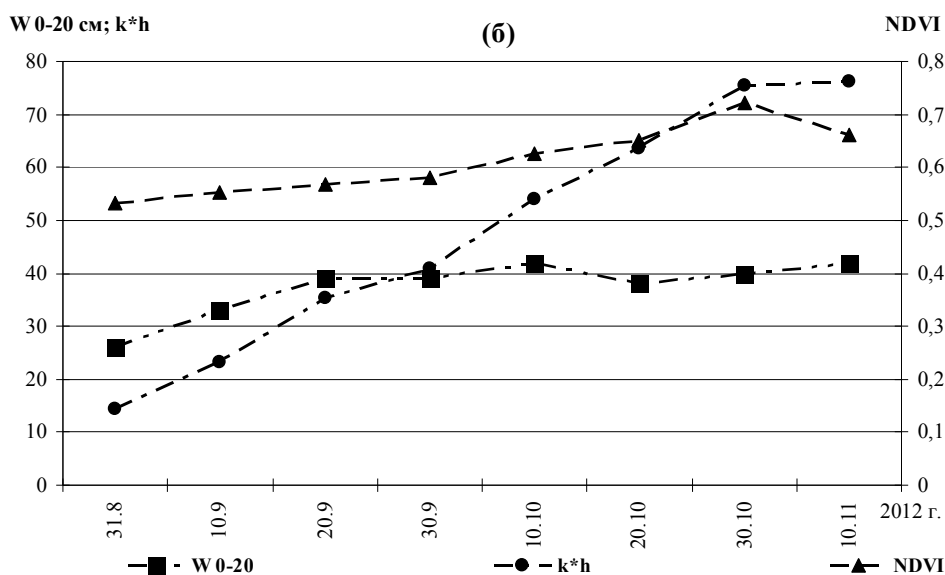


Рис. 6. Динамика запасов продуктивной влаги в слое почвы 0–20 см (W_{0-20}), показателя растительной массы озимых культур ($k \cdot h$) и вегетационного индекса NDVI по Республике Татарстан (а, б) и Оренбургской области (в, г) за 2010 и 2012 гг.

В результате исследований погодичных и осредненных за период 2003–2012 гг. данных по оценке состояния посевов озимых (т. е. площадей с плохим состоянием озимых осенью) с использованием данных NDVI и оценки их состояния по наземным данным в субъектах округа была получена их сравнительная качественная оценка. Эта оценка по Саратовской области и Республике Татарстан приведена в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная оценка состояния озимых зерновых культур осенью по спутниковым (NDVI) и наземным данным

Годы	Субъект РФ	Оценка состояния	
		по NDVI	по наземным данным (отклонение от средней площади в плохом состоянии, % посевной площади)
2004	Саратовская область	Лучше средней	Меньше средней
	Республика Татарстан	Хуже средней	Больше средней
2005	Саратовская область	Лучше средней	Больше средней
	Республика Татарстан	Лучше средней	Больше средней
2006	Саратовская область	Лучше средней	Меньше средней
	Республика Татарстан	Лучше средней	Меньше средней
2007	Саратовская область	Лучше средней	Меньше средней
	Республика Татарстан	Лучше средней	Меньше средней
2008	Саратовская область	Лучше средней	Меньше средней
	Республика Татарстан	Хуже средней	Меньше средней
2009	Саратовская область	Хуже средней	Больше средней
	Республика Татарстан	Хуже средней	Больше средней
2010	Саратовская область	Хуже средней	Больше средней
	Республика Татарстан	Хуже средней	Больше средней
2011	Саратовская область	Хуже средней	Меньше средней
	Республика Татарстан	Хуже средней	Больше средней
2012	Саратовская область	Лучше средней	Меньше средней
	Республика Татарстан	Лучше средней	Меньше средней
2013	Саратовская область	Лучше средней	Меньше средней
	Республика Татарстан	Лучше средней	Меньше средней

Из табл. 1 следует, что из общего числа случаев (20) качественная оценка состояния посевов по NDVI (хуже, лучше) совпала с расчетной оценкой площади с плохим состоянием озимых ($S_0, \%$) по наземным данным (больше или меньше средней площади) в 16 случаях, что составляет 80 %.

Для разработки метода количественной оценки состояния озимых зерновых культур осенью по наземным данным в комплексе с данными спутниковых наблюдений были рассчитаны матрицы связей площадей озимых в плохом состоянии с осредненными по субъектам, входящим в Приволжский федеральный округ, показателями условий тепло- и влагообеспеченности растений в период сева и осенней вегетации за декады, месяцы, отдельные периоды, а также с показателем растительной массы озимых и значениями вегетационного индекса (NDVI). Всего рассматривалось 17 параметров.

По большинству субъектов теснота связей площадей озимых культур в плохом состоянии осенью ($S_0, \%$) с агрометеорологическими параметрами за различные периоды (с количеством осадков, температурой воздуха, запасами продуктивной влаги в пахотном слое почвы, NDVI и показателем растительной массы) оказалась наиболее значимой с осредненными параметрами за период третья декада августа – вторая декада сентября, а с показателем растительной массы – на конец вегетации. Коэффициенты корреляции в большинстве субъектов колебались в основном от 0,46 до 0,75. При этом в отдельных южных областях региона (например, Саратовская область) коэффициент корреляции S_0 с NDVI был несколько большим по значению (-0,82), чем с агрометеорологическими параметрами: с запасами продуктивной влаги он был равен (-0,75), с осадками за указанный период (-0,77). В то же время, в северных субъектах округа более тесной была связь S_0 с агрометеорологическими параметрами, чем с NDVI. Необходимо отметить, что связь S_0 с температурой воздуха в большинстве субъектов территории округа оказалась менее тесной ($r = -0.36 \dots -0.42$) или лишь близкой к значимой.

Для наглядности связи S_0 с наиболее значимыми агрометеорологическими параметрами приведены на рис. 7 и 8.

На рис. 7 показана зависимость $S_0, \%$, от количества осадков ($P, \text{мм}$) за третью декаду августа – первую-вторую декады сентября и от запасов продуктивной влаги ($W_{0-20}, \text{мм}$) в пахотном слое почвы за тот же период по Республике Татарстан и Оренбургской области. На рисунке хорошо видно, что с увеличением количества осадков и запасов влаги S_0 уменьшается.

На рис. 8 показаны: а) зависимость S_0 от температуры воздуха по Саратовской (1) и Нижегородской областям (2), и б) зависимость S_0 от NDVI по Саратовской (1) и Кировской областям (2).

Можно видеть, что в Саратовской области S_0 с повышением температуры воздуха увеличивается, тогда как в Нижегородской области, напротив, уменьшается. Это, по-видимому, можно объяснить тем, что на юге округа (Саратовская область), где тепла для развития растений в большинстве лет достаточно, повышение температуры, чаще всего, сопряжено с дефицитом увлажнения, а в северных районах округа, где нередко наблюдается дефицит тепла, а увлажнение в большинстве лет достаточное, повышение температуры способствует хорошему развитию растений, особенно при поздних сроках сева, и, следовательно, уменьшению площадей с плохим состоянием озимых осенью.

Отметим также, что на севере округа (например, Кировская область и др.) связь S_0 с NDVI практически не выражена (рис. 8 б), что, вероятно, можно объяснить небольшими размерами полей с озимыми культурами в этих районах по сравнению с обширными

лесными массивами, тогда как в южных районах округа (например в Саратовской области) связь оказалась достаточно тесной.

Полученные результаты исследований позволили впервые разработать методику расчета оценки состояния озимых зерновых культур осенью (площадей в плохом состоянии) на основе учета наземных агрометеорологических параметров ($W_{0-20, \text{мм}}$, $(\text{k} \cdot \text{h})$) в комплексе со спутниковыми данными (NDVI) по субъектам Приволжского федерального округа. Нелинейные регрессионные многофакторные уравнения рассчитывались с учетом неодинакового характера связей S_0 с указанными параметрами, что объясняется большой протяженностью территории округа с севера на юг и различными погодными-климатическими условиями. В связи с этим все субъекты округа были разделены на несколько групп. В первую группу вошли Нижегородская, Кировская области, Пермский край, республики Удмуртия, Марий Эл, Чувашия, где условия увлажнения в большинстве лет бывают достаточными, а тепла в отдельные годы бывает мало. Во вторую группу вошли Республика Мордовия, Пензенская, Ульяновская области, где агрометеорологические условия осенью в большинстве лет бывают удовлетворительными, а в третью группу – Саратовская, Самарская и Оренбургская области, где часто наблюдаются засушливые условия осенью. Для республик Татарстан и Башкортостан наиболее устойчивыми оказались уравнения, полученные отдельно для каждого из этих субъектов.

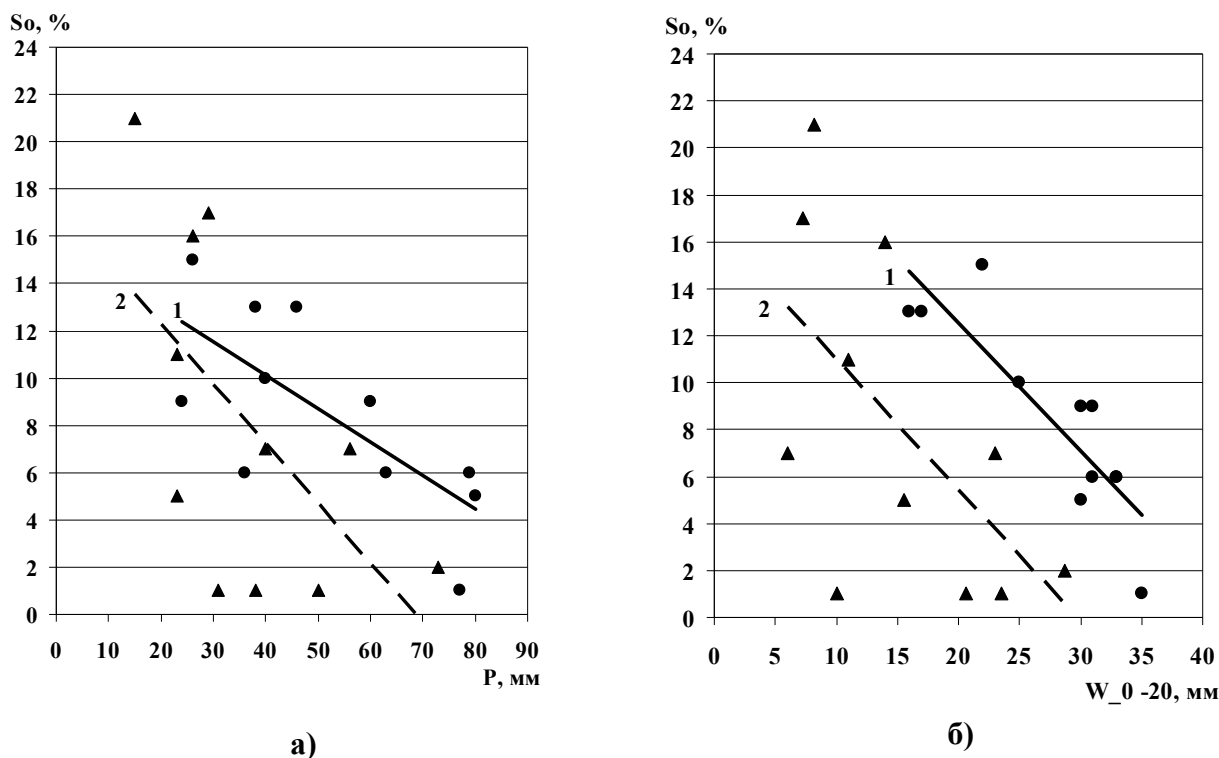


Рис. 7. Зависимость величины $S_0, \%$ от количества осадков (а) и запасов продуктивной влаги (б) в пахотном слое почвы за третью декаду августа – первую-вторую декады сентября по Республике Татарстан (1) и Оренбургской области (2).

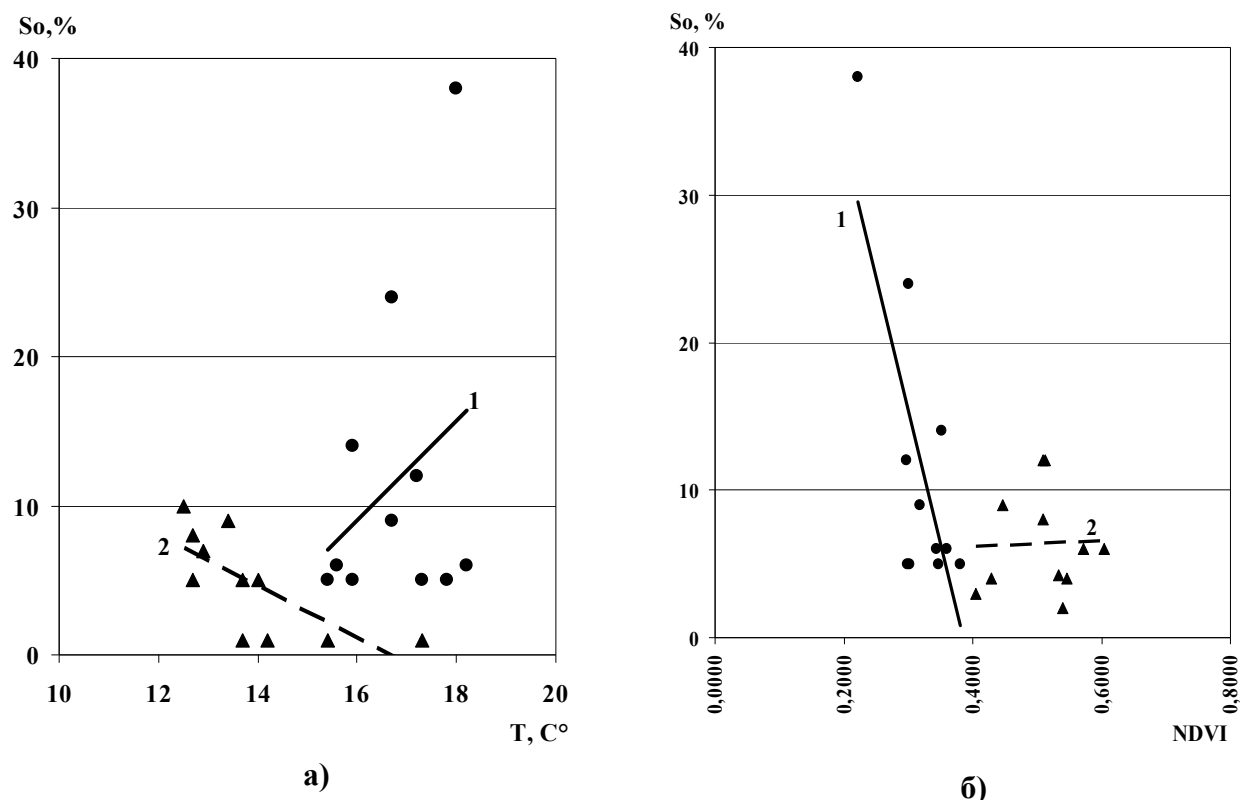


Рис. 8. Зависимость величины $S_0, \%$, от температуры воздуха за третью декаду августа – вторую декаду сентября в Саратовской (1) и Нижегородской (2) областях (а); Зависимость величины $S_0, \%$ от NDVI в Саратовской (1) и Кировской (2) областях (б).

Получены также новые регрессионные уравнения зависимости площадей с плохим состоянием озимых осенью от агрометеорологических параметров, рассчитанных по наземным данным (W_{0-20} мм, $(k \cdot h)$), осредненным за период третья декада августа – вторая декада сентября. Множественные коэффициенты корреляции этих уравнений по большинству субъектов были в основном существенно ниже, чем в уравнениях, где агрометеорологические параметры использовались в комплексе со спутниковыми данными.

Вид уравнений с использованием только наземных параметров и наземных в комплексе со спутниковыми данными на примере субъектов третьей группы приведен ниже:

$$S_0 = -1,177 \cdot W_{0-20} - 0,253(k \cdot h) + 46,400; R = 0,80. \quad (2)$$

$$S_0 = -0,752 \cdot W_{0-20} - 0,114 \cdot (k \cdot h) + 105,42 \cdot NDVI + 64,043; R = 0,80. \quad (3)$$

где W_{0-20} , $(k \cdot h)$ и NDVI – параметры уравнений, осредненные за период третья декада августа – вторая декада сентября.

Значения коэффициентов регрессии в полученных уравнениях для расчета площадей озимых в плохом состоянии осенью приведены в табл. 2. Обозначения в таблице: a_1 – коэффициент при запасах продуктивной влаги в пахотном слое почвы (W_{0-20}); a_2 – коэффициент при показателе растительной массы озимых $(k \cdot h)$; a_3 – коэффициент при

вегетационном индексе NDVI; С – свободный член уравнения; R – множественный коэффициент корреляции.

Таблица 2

Значения коэффициентов регрессии уравнений и множественных коэффициентов корреляции

Территория	По наземным данным				По наземным и спутниковым данным				
	a ₁	a ₂	С	R	a ₁	a ₂	a ₃	С	R
Первая группа: <i>Нижегородская, Кировская область, Пермский край, республики Удмуртия, Марий Эл, Чувашия</i>	-0,344	0,282	2,829	0,78	-0,378	0,364	16,007	3,482	0,83
Вторая группа: <i>Республика Мордовия, Ульяновская, Пензенская области</i>	-0,086	0,010	7,953	0,73	-0,094	0,015	7,529	5,041	0,74
Третья группа: <i>Саратовская, Самарская, Оренбургская области</i>	-1,177	-0,253	46,400	0,80	-0,752	-0,114	-105,42	64,043	0,85
Республика Башкортостан	-0,381	-0,041	15,516	0,61	-0,165	0,094	-84,621	41,435	0,85
Республика Татарстан	-0,458	-0,012	20,463	0,83	0,061	0,073	-83,244	41,269	0,92

Авторская проверка полученных уравнений (на зависимых данных) показала, что фактическая оправдываемость расчетов S_0 по наземным данным составляет 86 %, а по наземным данным в комплексе со спутниковыми данными – 94 %.

Заключение

На основе приведенных результатов исследований можно сделать вывод, что методы оценки состояния озимых зерновых культур, основанные на комплексировании наземных и спутниковых данных, после проведения производственных испытаний могут быть использованы в оперативном агрометеорологическом обеспечении сельского хозяйства на территории Приволжского федерального округа для количественной оценки площадей озимых, находящихся в плохом состоянии осенью к моменту прекращения вегетации.

При условии интеграции данных спутникового сервиса ВЕГА и имеющегося в организациях Росгидромета методического и информационного обеспечения на основе данных наземных агрометеорологических наблюдений, создается новая возможность оперативной оценки состояния озимых культур. Эффективное использование этих возможностей позволит вывести на принципиально новый технологический уровень решение задач объективного дистанционного мониторинга сельскохозяйственных культур.

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., Егоров В.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А.* Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локально-адаптивной классификации // Компьютерная оптика. – Самара: ИСОИ РАН, 2011. – Т. 35, № 1. – С. 103–116.
3. *Вильфанд Р.М., Страшная А.И.* Климат, прогнозы погоды и агрометеорологическое обеспечение сельского хозяйства в условиях изменения климата // Адаптация сельского хозяйства России к меняющимся погодно-климатическим условиям. Сборник докладов международной научно-практической конференции 7–11 декабря 2010 г. – М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2011. – С. 23–38.
4. *Грудева А.Я.* Об оценке агрометеорологических условий осенней вегетации озимых // Метеорология и гидрология. – 1966. – № 5. – С. 42–45.
5. *Клещенко А.Д.* Агрометеорологическое и агроклиматическое обеспечение аграрного сектора экономики России // Труды ВНИИСХМ. – 2010. – Вып. 37. – С. 5–21.
6. *Клещенко А.Д., Найдина Т.А., Гончарова Т.А.* Использование данных дистанционного зондирования для моделирования продукционного процесса кукурузы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9, № 1. – С. 259–268.
7. *Лупян Е.А., Барталев С.А., Савин И.Ю.* Технологии спутникового мониторинга в сельском хозяйстве России // Аэрокосмический курьер. – 2009. – № 6. – С. 47–49.
8. *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.
9. *Максименкова Т.А.* Способы расчета и оценки состояния озимых зерновых культур осенью на больших площадях // Метеорология и гидрология. – 1976. – № 5. – С. 89–95.
10. *Максименкова Т.А.* Методы оценки и прогноза состояния озимых зерновых культур осенью. – Обнинск: ФООП ВНИИГМИ МЦД, 1990. – 51 с.
11. *Моисейчик В.А.* Агрометеорологические условия и перезимовка озимых культур. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 294 с.
12. *Плотников Д.Е., Барталев С.А., Жарко В.О., Михайлов В.В., Просянникова О.И.* Экспериментальная оценка распознаваемости агрокультур по данным сезонных спутниковых измерений спектральной яркости // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8, № 1. – С. 199–208.

13. Плотников Д.Е., Барталев С.А., Лулян Е.А. Метод детектирования летне-осенних всходов озимых культур по данным радиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2008. – Т. 5, № 2. С. 322–330.

14. Страшная А.И. Использование показателей увлажнения для оценки засушливости и прогноза урожайности зерновых культур в Поволжском экономическом районе // Труды Гидрометцентра СССР. – 1993. – Вып. 327. – С. 15–22.

15. Страшная А.И. Состояние и проблемы оперативного агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства на федеральном уровне в условиях глобального изменения климата // Труды ВНИИСХМ. – 2007. – Вып. 36. – С. 78–91.

16. Страшная А.И., Максименкова Т.А., Богомолова Н.А., Чуб О.В. Об агрометеорологическом обеспечении сельского хозяйства в период уборки и осенней вегетации озимых зерновых культур в условиях потепления климата // Труды ВНИИСХМ. – 2010. – Вып. 37. – С. 42–67.

17. 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.

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

Поступила в редакцию 28.03.2014 г.