

Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных: возможности и перспективы

И.Ю. Савин, С.А. Барталев, Е.А. Лупян, В.А. Толпин, С.А. Хвостиков

*Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная 84/32
E-mail: savin@smis.iki.rssi.ru*

Рассмотрена специфика использования спутниковых данных для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур на уровне областей и административных районов. Основное внимание в статье уделено трем основным группам методов прогнозирования: на основе установления года-аналога на основе динамики вегетационного индекса, построение регрессионных зависимостей между характеристиками, получаемыми на основе спутниковых данных, и различных статистических данных, а также на основе имитационного моделирования развития посевов. Приведены примеры использования данных методов, оценены их недостатки и преимущества. Рассмотрены направления и перспективы использования данных дистанционного зондирования для решения задач прогнозирования урожайности.

Ключевые слова: прогнозирование урожайности, спутниковые данные, NDVI, MODIS

Введение

Урожайность сельскохозяйственных культур является важным показателем эффективности сельскохозяйственного производства, который широко используется при планировании, регулировании рынков сельскохозяйственной продукции, импортно-экспортных операций. Существующая в России (также впрочем, как и в других странах Мира) система получения данных об урожайности на уровне страны и субъектов РФ в настоящее время недостаточно оперативна и стоит в большой степени на основе различной субъективной информации. В связи с этим, большое значение имеет разработка подходов прогнозирование урожайности, которые бы позволили получать оценки достаточно формализованными методами на основе объективной оперативно поступающей информации, в том числе и данных дистанционного зондирования.

В настоящее время разработаны и применяются на практике различные подходы к прогнозированию урожайности:

1. анализ тренда и цикличности в динамичности урожайности [1-5],
2. выявление года-аналога [6-8],
3. построение регрессионных зависимостей между различными статистическими данными и различными данными, полученными на основе дистанционных и метеорологических наблюдений (далее «регрессионный метод»)[5,9],
4. на основе моделирования [5,10],
5. на основе анализа синоптических процессов [11-14].

Подходы первой, второй и пятой групп отличаются большой заблаговременностью, но недостаточной точностью. Наиболее широко используются подходы 3 и 4 групп. В качестве входной информации для построения регрессии или для моделирования роста растений используются в большинстве случаев метеорологические данные. То есть, прогноз строится в основном на использовании косвенных факторов, а не на анализе фактического состояния посевов.

В последние годы, для прогнозирования урожайности все шире привлекаются спутниковые данные, преимуществом которых является то, что они позволяют оперативно анализировать состояние посевов на больших территориях [15-19]. В настоящей работе представлены основные возможности подходов использования спутниковых данных для заблаговременного прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур, которые в настоящее время активно разрабатываются в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), в том числе и в рамках работ по созданию Системы дистанционного мониторинга земель агропромышленного комплекса (СДМЗ АПК) [20]. В настоящее время такие работы ведутся по трем направлениям: оценка урожайности по году-аналогу, с использованием регрессионного анализа и на основе имитационного моделирования развития культур (в этом направление делаются лишь первые шаги).

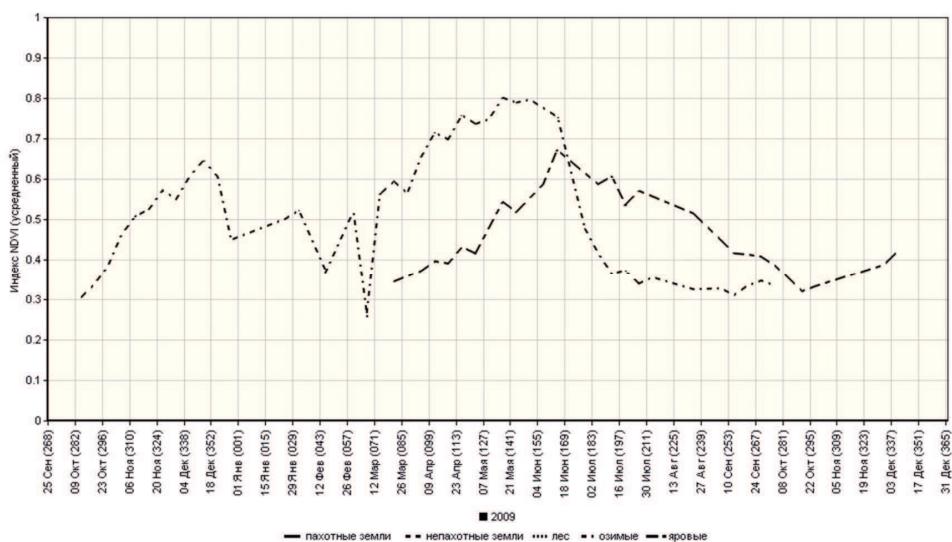


Рис. 1. Ход вегетационного индекса NDVI, осредненного для полей с озимыми (пунктир с точкой) и яровыми (пунктирная линия) культурами (2009 год, Краснодарский край)

Методы

Основная идея метода прогнозирования **по году-аналогу** заключается в том, что если посевы определенной культуры в регионе развивались в текущем сезоне также как в каком-либо прошлом сезоне, то и урожайность должна быть близка к урожайности этого года-аналога. Спутниковые данные являются надежным инструментом оценки подобной схожести в развитии посевов. При этом состояние посевов анализируется по прямым признакам на основе анализа динамики различных индексов полученных на основе спутниковых данных отражающих состояние растительного покрова. Тем самым косвенно учитывается влияние на растения большинства факторов, предопределяющих их развитие (включая метеоусловия (в том числе и экстремальные), использование удобрений и ядохимикатов, специфика агротехники и т.п.). Неоптимальность этих факторов приводит к изменению состояния посевов, что отражается на динамике измеряемых вегетационных индексов. Одним из преимуществ данного подхода также является возможность нахождения года-аналога в отдельности для каждой возделываемой культуры (при наличии маски ее посевов, которая также может быть восстановлена с использованием спутниковых дан-

ных). Известно, что разные сельскохозяйственные растения по-разному реагируют на изменение условий роста. Поэтому, изменение этих условий может приводить к гибели одной культуры, и слабо влиять на развитие другой, находящейся в том же регионе. Как хорошо видно, например, из рисунка 1, ход сезона вегетации для озимых и для яровых в пределах Краснодарского края в 2009 году сильно отличался.

Кроме общей оценки хода текущего вегетационного сезона, метод года-аналога позволяет оперативно выявлять регионы, где посевы повреждаются в результате воздействия неблагоприятных погодных или фитосанитарных условий (засуха, заморозки, условия перезимовки, саранча и т.п.) (рис.2). На рисунке видно, что осредненная кривая индекса в сезоне 2010 года (красная кривая) для Хохольского района идет близко к норме, а для Поворинского – близко к абсолютному минимуму. Связано это с разницей в доле озимых посевов, поврежденных из-за неблагоприятных условий перезимовки (около 16% в Хохольском и около 80% посевов в Поворинском районах).

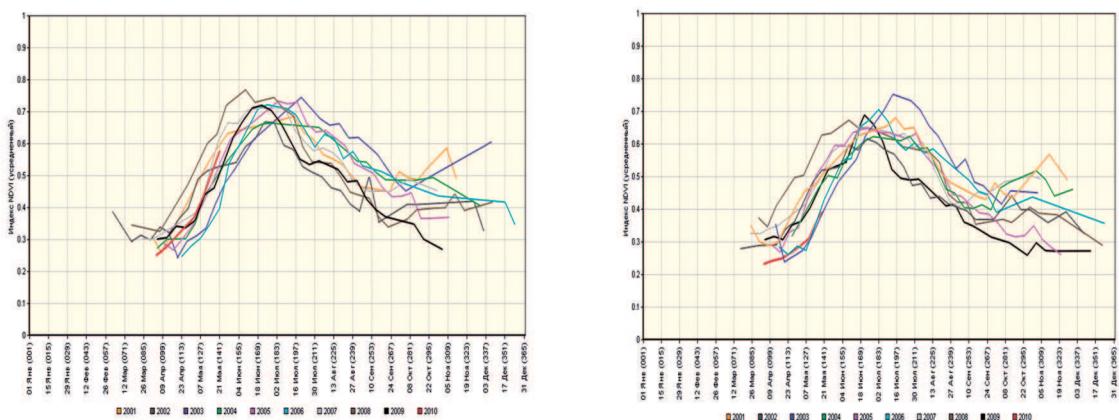


Рис. 2. Ход вегетационного индекса NDVI, осредненного для пахотных земель Хохольского (А) и Поворинского (Б) районов Воронежской области, за последние вегетационные сезоны

Используя анализ года-аналога можно получить в первом приближении оценку ожидаемого урожая культуры в конкретном регионе. Подобные оценки можно получать с начала сезона вегетации и обновлять их до окончания сезона по мере получения дополнительных спутниковых данных. Так, например, анализ года-аналога для сезона 2000/2010 года позволяет получить оценку ожидаемой урожайности озимой пшеницы в разрезе некоторых субъектов РФ в следующем виде (рис.3).

Следует отметить, что при использовании данного метода необходимо принимать во внимание то, что на характер осредненной кривой вегетационного индекса большое влияние может оказывать сдвиг сезона вегетации из-за метеорологических условий, а также изменение от года к году площадей посевов отдельных культур. Также необходимо указать на то, что сам метод установления года-аналога может быть разным для разных регионов и для разных культур и должен определяться опытным путем с учетом специфики возделывания культуры и доли ее посевов в регионе.

Особенности использования «регрессионного метода» проиллюстрируем на примере прогнозирования урожайности озимой пшеницы на уровне субъектов РФ. Для предсказания урожайности для каждого региона России строились регрессии значений урожайности (данные РОСКОМСТАТа) за прошлые годы с различными предикторами, получаемыми на основе спутниковых данных.

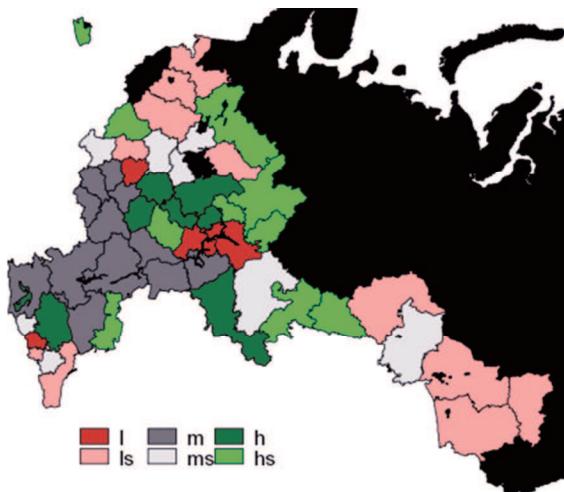


Рис. 3. Ожидаемая урожайность озимой пшеницы в 2010 году (оценка по методу года-аналога). Условные обозначения: *l* – ниже среднего (регионы, где посевов культуры более 10% от общей посевной площади); *ls* – ниже среднего (регионы, где посевов культуры менее 10% от общей посевной площади); *h* – выше среднего (регионы, где посевов культуры более 10% от общей посевной площади); *hs* – выше среднего (регионы, где посевов культуры менее 10% от общей посевной площади); *m* – близко к среднему (регионы, где посевов культуры более 10% от общей посевной площади); *ms* – близко к среднему (регионы, где посевов культуры менее 10% от общей посевной площади)

Естественно, что в качестве предикторов могут использоваться совершенно различные характеристики. В качестве основы для построения предикторов используются следующие данные: вегетационный индекс NDVI, рассчитанный по данным приборов SPOT-VEGETATION (спутники SPOT) и MODIS (спутники Terra и Aqua), метеорологические данные о температуре и осадках (<http://www.ecmwf.int/products/forecasts/>), карта пахотных земель, созданная по базе данных GLC 2000 [21], и карта земель с посевами озимых культур, построенная на базе данных MODIS в ИКИ РАН [22]. С помощью этих данных для каждого региона, для которого имеются статистические данные об урожайности, могут быть построены, например, следующие предикторы, осредненные по различным типам земель (пахотным, занятым озимыми культурами, покрытыми лесом и т.д.):

1. Сезонный максимум NDVI по данным SPOT-VEGETATION.
2. Максимальное значение NDVI по данным SPOT-VEGETATION за октябрь – декабрь прошлого года.
3. Значение NDVI по данным SPOT-VEGETATION во время цветения озимой пшеницы. (Для вычисления времени цветения вычислялась сумма среднесуточных температур, превышавших 10°, с февраля месяца конкретного года. Дата, когда эта сумма достигла 500°, принималась условно за дату цветения.)
4. Значения NDVI по данным SPOT-VEGETATION для различных сумм температур (200°, 300°, 400°, и.т.д.).
5. Значения NDVI по данным SPOT-VEGETATION за каждую декаду в году.
6. Сезонный максимум NDVI по данным MODIS.
7. Значения NDVI по данным MODIS за каждую неделю.
8. Различные климатические параметры, такие как средняя температура воздуха за октябрь – ноябрь предыдущего года, средняя температура за март - апрель, абсолютный минимум температур в мае, сумма осадков за период август - сентябрь.

Используя значения этих предикторов за текущий год и уравнение парной линейной регрессии, построенное по значениям этого предиктора за прошлые годы, может

предсказываться значение урожайности различных культур в текущем сезоне. Из множества всех построенных регрессий для предсказания урожайности естественно выбирать наиболее качественные регрессии. Критерием качества может, например, являться квадрат корреляции между значениями предиктора и урожайности за прошлые годы.

Естественно, что такой подход будет давать разные результаты для различных культур. Детальный анализ, проведенный на примере озимой пшеницы, показывает, что по данным предикторам почти в каждом регионе России удается построить приемлемые уравнения регрессии (квадрат корреляции для которых больше 0.8), по которым в дальнейшем можно предсказать урожайность в данном регионе. Для регионов, где не удалось построить приемлемое уравнение парной регрессии, были построены множественные регрессии с использованием тех же предикторов. При построении регрессий, наиболее результативными оказались предикторы из наборов 4, 5 и 7 (см. выше). Предикторы из наборов 1,2,3 и 6 позволили построить меньшее количество качественных регрессий. Предикторы из набора 8 дали крайне малое количество хороших регрессий, но при этом они позволили построить достаточно качественные множественные регрессии для многих регионов. В таблице 1 приведен пример использования приемлемых регрессий, в которых показаны данные об урожайности по официальной статистике в сравнении со значениями урожайности, полученными с помощью построенной регрессии.

Для каждого региона была также составлена таблица, в которой описано, насколько качественную регрессию удалось построить для каждого момента времени. Полученные данные показали, что качественный прогноз урожайности может быть построен для некоторых областей России еще в предзимний период развития озимой пшеницы, то есть с очень высокой заблаговременностью.

Таблица 1. Сравнение прогноза урожайности, полученной по методу регрессионного анализа с данными официальной статистики (республика Ингушетия, предиктор «значение NDVI по данным MODIS за 13 неделю года»)

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Данные официальной статистики ц/га	8,4	3,8	14,1	13,8	13,3	12,1	15,5	17,2
Прогноз по регрессии ц/га	9,6	4,1	13,5	-	12,1	11,0	16,6	15,9

Таким образом, первые результаты апробации подхода, основанного на регрессионном анализе, показали, что этот простой метод при наличии достаточно протяженного ряда качественных спутниковых данных (10 лет) уже позволяет получить достаточно хорошие результаты. Для улучшения точности получаемых прогнозов можно вводить дополнительные, более информативные предикторы, а также использовать различные множественные регрессии. В настоящее время работы по развитию данного подхода и анализа возможностей его применения для прогнозирования урожайности различных культур достаточно активно ведутся в ИКИ РАН.

Кроме описанных выше двух подходов к прогнозированию урожайности разрабатывается метод, основанный на **моделировании** ежедневного прироста биомассы растений с начала вегетационного сезона. Рассмотрим в качестве примера предварительные результаты, полученные для посевов риса в республике Калмыкия.

Моделирование ведется для полей, где присутствуют посевы риса в текущем сезоне вегетации. Подобные поля распознаются по данным МОДИС на основе подходов, изложенных ранее [23]. В рамках данных подходов, идентификация полей с посевами риса

проводится в начале сезона вегетации. После этого, начинается моделирование нарастания биомассы с начала сезона вегетации на каждом конкретном поле.

В основу моделирования ежедневного прироста биомассы риса были положены подходы, разработанные Ничипоровичем (1963) [24] и Monteith (1977) [25]. Суть данных подходов заключается в том, что рост растений потенциально предопределется приходящей радиацией. Потенциальный рост может ограничиваться температурными условиями, избытком радиации и доступностью растениям влаги. Влияние на рост растений таких факторов, как доступность питательных элементов, а также болезней и вредителей растений в данном подходе не учитывается. При этом считается, что лимитирующее влияние этих факторов может быть учтено опосредованно, через изменение площади ассимиляционного аппарата. Кроме того, при построении модели учитывалось, что при соблюдении агротехники возделывания риса влияние такого фактора, как доступность влаги, можно не учитывать. Таким образом, модель накопления биомассы рисом в общем виде может быть записана следующим образом:

$$\mathbf{Bd} = \mathbf{LUE} * \mathbf{faPAR} * \mathbf{PAR} - \mathbf{RES}$$

где: **Bd** – масса растения, накопленная за день; **LUE** – эффективность использования света растением; **faPAR** – фракция абсорбированной растительным покровом радиации; **PAR** – фотосинтетически активная радиация; **RES** – респирация состояния растения.

Эффективность использования растениями света оценивалась следующим образом:

$$\mathbf{LUE} = \mathbf{LUEmax} * \mathbf{Ct} * \mathbf{Cr}$$

где: **LUE** – эффективность использования света растением; **LUEmax** – максимальная эффективность использования света растением; **Ct** – поправка на температурные условия; **Cr** – поправка на количество приходящей радиации.

Для оценки максимальной эффективности использования света растениями использовался подход, предложенный Rosema et al. [26]. Расчет поправки на неоптимальные температуры проводился по формуле, приведенной в [27]. При избытке приходящей радиации фотосинтез замедляется из-за насыщения энзимных цепей, и это учитывалось путем введения поправки на избыточность приходящей радиации [28].

Респирация состояния для риса рассчитывалась следующим образом:

$$\mathbf{RES} = 0.015 * \mathbf{Bt} * 2^{((\mathbf{Td} - \mathbf{Tmr}) / 10)}$$

где: **RES** – респирация состояния; **Bt** – биомасса растения; **Td** – средняя суточная температура воздуха; **Tmr** – средняя взвешенная суточная температура воздуха за предыдущие 10 дней.

Моделирование накопления биомассы велось для полей с посевами риса с временным шагом в один день. Дата начала моделирования определялась по началу роста вегетационного индекса NDVI в пределах каждого поля орошаемого массива. Моделирование заканчивалось в момент максимального развития листовой поверхности растений, которое индицировалось по достижению сезонного максимума NDVI. И полученные величины накопленной биомассы за этот период (с начала вегетации и до достижения максимума листовой поверхности) использовались в качестве индикатора урожайности риса на от-

дельных полях. Полученные величины накопленного вещества для отдельных полей с посевами риса взвешенно осреднялись для всей территории орошаемого массива, и затем полученные величины сравнивались со статистическими значениями урожайности риса.

Фракция абсорбированной радиации (faPAR) определялась по спутниковым данным MODIS по методу [29]. Значения вегетационного индекса NDVI также рассчитывались по данным этого сенсора в виде декадных (10-дневных) максимумов. Предварительная обработка, коррекция данных и расчет индексов были проведены бельгийским институтом VITO (Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek) на основе специально разработанных методов [30]. В нашем распоряжении имелись данные за 2004-2008 годы. Временные ряды декадных значений индексов не сглаживались, а пропуски были заполнены с использованием метода простой интерполяции.

В качестве источника ежедневных метеорологических данных при моделировании использовалась информация глобальной модели атмосферы, разработанной в ECMWF (Ридинг, Англия). Данные представлены в виде точек с расстоянием друг от друга в 1 градус. Нами использовались данные ближайшей к орошаемому массиву точки.

Моделирование нарастания биомассы риса для орошаемого массива Сарпинской степи в Калмыкии было проведено для сезонов 2004-2008 годов. Предварительно для этих сезонов по спутниковым данным MODIS были построены маски полей с посевами риса. Затем для каждого поля было проведено моделирование нарастания биомассы. Пример результатов моделирования представлен на рисунке 4.



Рис. 4. Количество ассимилированного за день вещества для одного из полей с посевами риса

Так как для моделирования использовались одни и те же метеорологические данные для всех полей с рисом, то ход накопления биомассы в течение сезона вегетации был похож для всех полей в течение одного сезона вегетации, но не был идентичен. При этом амплитуда накопления биомассы была различна для разных полей в зависимости от разницы в величине faPAR. В свою очередь эта разница обусловлена неодинаковой датой начала вегетации риса на разных полях, и как следствие этого, неодинаковыми метеорологическими условиями вегетации. Несмотря на компактное расположение полей с рисом, оказалось, что пространственное варьирование (от поля к полю) накопленной биомассы в течение одного сезона вегетации вполне сопоставимо с его межсезонным варьированием.

На основе результатов моделирования по отдельным полям рассчитывалась средневзвешенная величина накопленной биомассы для всего орошаемого массива Сарпинской степи. Теоретически, эта величина должна соответствовать средней урожайности риса на уровне республики Калмыкия. Сравнение величины урожайности риса, полученной на основе моделирования для 5 вегетационных сезонов, с данными официальной статистики приведено в таблице 2.

Из таблицы следует, что величины урожайности риса, полученные по результатам моделирования, несколько отличаются от данных официальной статистики. При этом статистические данные во всех случаях имеют более низкие значения урожайности, чем результаты моделирования. Эта разница более-менее постоянна от сезона к сезону. Наблюдается полное совпадение локальных экстремумов на кривых динамики урожайности, полученных обоими методами. Все это позволяет сделать предположение о том, что величины урожайности, получаемые по результатам моделирования, достаточно хорошо воспроизводят динамику официальной статистической урожайности.

Более низкие значения официальной статистической урожайности могут быть связаны с тем, что моделирование ведется на уровне отдельных полей, и при расчетах не учитываются потери урожая при уборке и транспортировке зерна, которые заложены в официальную статистическую информацию.

Таблица 2. Урожайность риса в Калмыкии, полученная по данным моделирования, в сравнении с официальными статистическими данными Росстата

урожайность риса (ц/га) по данным:	год				
	2004	2005	2006	2007	2008
моделирования	30.6	33.3	36	32.9	36.8
официальной статистики (Росстат)	20.7	25.9	30.9	28.7	32.1

Таким образом, данный подход позволяет оценивать урожайность риса с достаточно большой заблаговременностью, в середине сезона вегетации. Моделирование нарастания биомассы проводится на уровне отдельных полей. А осредненные на уровень республики величины урожайности, полученные по данным моделирования, полностью воспроизводят динамику официальной статистической урожайности риса за период 2004-2008 годы.

Преимуществом подобного подхода к прогнозированию урожайности является полная независимость получаемых результатов от статистических данных, что позволяет рассматривать разработанный подход как надежное средство независимого контроля качества статистической информации, поступающей с мест.

Обсуждение и выводы

Опыт использования разработанных подходов и приведенные выше примеры показывают, что спутниковые данные могут служить основой для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур на уровне субъектов РФ. Как и все другие методы прогнозирования урожайности, они имеют свои преимущества и недостатки.

Наиболее эффективное использование метода по году-аналогу возможно лишь при учете специфики возделывания культур в каждом конкретном регионе и при привлечении данных о площадях сева всех культур региона в конкретном сезоне. На данном этапе отсутствие этой информации существенно осложняет интерпретации получаемых результатов.

Отсутствие в настоящее время длинных рядов качественных спутниковых данных приводит к недостаточной устойчивости подходов, основанных на регрессионном анализе. Предлагаемые некоторыми исследователями методы пространственной агрегации регионов с целью увеличения объема выборки могут привести к некоторому увеличению устойчивости строимых регрессионных зависимостей. Однако подобная агрегация возможна лишь для ограниченного количества регионов, имеющих схожие природные условия и одинаковые особенности возделывания культур. Кроме того, большое влияние на качество результатов прогнозирования по этому подходу оказывает качество официальной статистики, которая используется при построении регрессионного уравнения. При использовании данного подхода необходимо принимать во внимание и тот факт, что спутниковые данные отражают состояние растительности на уровне поля, а доступная официальная статистика представляет собой цифры, рассчитанные как минимум на уровне хозяйств, в которых учтены разнообразные потери урожая (при транспортировке, усушке, утряске и т.п.).

Подходы, основанные на методах имитационного моделирования, являются наиболее объективными, но одновременно, и наиболее трудоемкими для введения в практику оперативного прогнозирования урожайности. Для их широкого внедрения требуется большой объем полевых данных, необходимых для калибровки моделей. Но большим преимуществом данных подходов является то, что после калибровки они позволяют получать прогнозы и оценки урожайности, не зависящие от официальной статистики и позволяют делать прогноз для отдельных полей с посевами культуры.

В обобщенном виде основные преимущества и недостатки подходов можно представить в виде таблицы (Табл. 3).

Несмотря на отмеченные недостатки спутниковых методов прогнозирования урожайности и их недостаточную развитость на данный момент, они, безусловно, являются наиболее перспективными в связи с их объективностью, оперативностью, охватом больших территорий. Использование результатов прогнозирования урожайности на основе спутниковых данных наряду с результатами, полученными другими методами, на наш взгляд может позволить повысить как качество прогнозов, так и их заблаговременность, что, безусловно, необходимо для повышения эффективности принятия различных управлеченческих решений в области сельского хозяйства.

Таблица 3. Преимущества и недостатки разных методов прогнозирования урожайности по спутниковым данным среднего пространственного разрешения

подход	Преимущества	недостатки
год-аналог	простота использования в автоматическом режиме отсутствие необходимости предварительной калибровки	необходимость учета изменений площадей сева более подходят для качественного прогноза сильно зависит от специфики конкретного региона
регрессионный метод	количественный прогноз большая заблаговременность отсутствие необходимости в полевых данных	отсутствие больших выборок для построения регрессии неизвестное качество данных официальной статистики и позднее появление данных официальной статистики за прошлый сезон
моделирование	независимость от официальной статистики хорошая заблаговременность возможность учета при необходимости сортовых различий	сложность алгоритмов необходимость калибровки по полевым данным необходимость наличия маски полей с конкретной культурой

Литература

1. Батырева О.В. Расчет значимости коэффициента множественной корреляции и выбор оптимального числа предсказателей. // Метеорология и гидрология. — 1969. — № 3. — С. 49-57.
2. Пасов В.М. Изменчивость урожаев и оценка ожидаемой продуктивности зерновых культур. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980. — 152 с.
3. Пасов В.М. Изменчивость урожая яровых зерновых культур в различных климатических зонах СССР. // Метеорология и гидрология. — 1973. — № 7. — С. 82-86.
4. Пасов В.М. Климатическая изменчивость урожаев озимой пшеницы. // Метеорология и гидрология. — 1973. — № 2. — С. 94-103.
5. Methodology of the MARS Crop Yield Forecasting System (2008). Eur Rep 21291 EN/1-4
6. Savin I., Nègre T. (ed.) Agro-meteorological monitoring in Russia and Central Asian Countries, OPOCE EUR 22210EN, Ispra (Italy), 2006. - 214pp.
7. Savin I. Crop yield prediction with SPOT VGT in Mediterranean and Central Asian countries. - ISPRS Archives XXXVI-8/W48 Workshop proceedings: Remote sensing support to crop yield forecast and area estimates. Commission VIII, WG VIII/10. 2007. Stresa, Italy. pp.130-134
8. Rembold F., Savin I., Nègre T., 2005. Developing a simple operational multistep procedure for quantitative yield/production estimation. Proceedings of the AfricaGIS2005 Conference, 31 October to 4 November 2005, The Geo-Information Society of South Africa Tshwane (Pretoria), South Africa ISBN 1-920-01710-0, pp. 257-269.
9. Руководство по агрометеорологическим прогнозам. Под ред. Улановой Е.С., Моисейчик В.А., Полевого А.Н. — Л.: Гидрометеоиздат, т. 1-2, 1984.
10. Сиротенко О.Д., Абашина Е.А. Об оценке использования динамических моделей для оценки агрометеорологических условий формирования урожая. Метеорология и гидрология, № 8, 1982, с.95-101.
11. Пасов В.М., Аксарина Е.А. Синоптико-статистический метод прогноза урожая зерновых культур до сева. // Труды ИЭМ. — 1979. — Вып. 13(91). — С.16-41.
12. Воронина В.Ф., Худякова А.И. Особенности атмосферной циркуляции в годы с высокой и низкой урожайностью картофеля в Приморье. // Труды ДВНИГМИ. — 1979 — Вып. 85. — С. 62-69.
13. Steyaert L.T., Le Duc S.K., McQuigg J.D. Atmospheric pressure and wheat yield modeling. Agric. Meteorology, 1978 , v.19, N.1, p.23-24
14. Wang Duo, Zhang Tan. Analysis of the long-term fluctuation of the large-scale circulation and corn yield in the North and the South-West of China. Acta Meteorologica Sinica, 1983, v.41, N.4, p.460-471
15. Tucker C. J., Holben, B. N., Elgin J. H., McMurtrey III J. E., Relationship of spectral data to grain yield variation/Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, **46**, pp. 657-666, 1980.
16. Grotens S.M.E., "NDVI – crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso", International Journal of Remote Sensing, **14**, pp. 1495-1515, 1993.
17. Pasmussen M.S., "Operational yield forecasting using AVHRR NDVI data: prediction of environmental and inter-annual variability", International Journal of Remote Sensing, **18**, pp. 1059-1077, 1997.
18. Manjunath K.R., Potdar M.B., Purohit N.L., "Large area operational wheat yield model development and validation based on spectral and meteorological data", International Journal of Remote Sensing, **v.23**, pp. 3023-3038, 2002.
19. Савин И.Ю., Статакис Д., Нээр Т., Исаев В.А. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур с использованием нейронных сетей. - Доклады РАСХН, 2006, 6, стр.11-14.
20. Барталев С.А., Лупян Е.А., Нестеренко А.А., Савин И.Ю. Создание системы дистанционного мониторинга земель агропромышленного комплекса России (СДМЗ АПК) // Седьмая всероссийская открытая ежегодная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва. ИКИ РАН. 16-20 ноября 2009. Сборник тезисов конференции., 2009. С.4.
21. Bartalev S., Belward A., Erchov D., Isaev A. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia . INT. J. REMOTE SENSING, 2003, VOL. 24, NO. 9. - pp.1977–1982
22. Д.Е. Плотников, С.А. Барталев, Е.А. Лупян Метод детектирования летне-осенних всходов озимых культур по данным радиометра MODIS (http://d33.infospace.ru/d33_conf/2008_pdf/2/42.pdf)

23. Савин И.Ю., Барус Б. Оперативный мониторинг площадей посевов риса в Калмыкии на основе данных MODIS. – Исследование Земли из Космоса, 2009, 5, стр.66-74
24. Ничипорович А.А. О путях повышения продуктивности фотосинтеза растений в посевах. – в сб.: Фотосинтез и вопросы продуктивности растений. – М.:АН СССР. – 1963.
25. Monteith J.L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. – Philos.Trans. R. Soc. London, Ser.B. Biol. Sci. 281(980). – p.277-294
26. Rosema, A., Verhees, L., van Putten, E., Gielen, H., Lack, T., Wood, J., Lane, A., Fannon, J., Estrela, T., Dimas, M., de Bruin, H., Moene, A., Meijninger, W. European Energy and Water Balance Monitoring System. EU FP4 final report, contract ENV-CT97-0478, 2001
27. Yin X., Kropff M.J., McLaren G., Visperas R.M. A nonlinear model for crop development as a function of temperature. – Agricultural and Forest Meteorology. V.77. 1995. – p.1-16
28. Choudhury B.J. Modeling radiation and carbon-use efficiencies of maize, sorghum, and rice. - Agricultural and Forest Meteorology. V.106. 2001. – p.317-330
29. Gobron N., Pinty B., Taberner M., Mélin F., Verstraete M. M. and Widlowski J.-L. (2006) 'MONITORING THE PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY VEGETATION FROM REMOTE SENSING DATA. - Advances in Space Research, 38, 2196-2202
30. Royer, A., Genovese, G. (Eds.). Methodology of the MARS Crop Yield Forecasting System. Vol.3. Remote Sensing Information, Data Processing and Analysis. OPOCE, Luxembourg, 2004

Crop yield forecasting based on satellite data: opportunities and perspectives

I. Savin, S. Bartalev, E. Loupian, V. Tolpin, S. Khvostikov

*Space Research Institute of Russian Academy of Sciences,
117997 Moscow, Profsoyuznaya str., 84/32
E-mail: savin@smis.iki.rssi.ru*

Specifics of application of satellite data for crop yield forecasting at oblast and administrative raion level has been investigated. Three groups of predictive methods have been analyzed: method of year-analogue, regression analysis, and imitative crop growth modeling. Advantages and disadvantages of the methods have been analyzed based on concrete examples. Perspectives of the methods developments and improvements are discussed.

Key words: crop yield forecasting, satellite data, NDVI, MODIS