

Повышение надежности прогнозирования урожая сельхозкультур по радиолокационным космическим снимкам высокого разрешения

Л.М. Атрошенко², М.Д. Атрошенко, Н.Н. Горобец¹, Л.П. Сафронова¹

¹ Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина
61077 Украина, г. Харьков, пл. Свободы, 4

E-mail: Nikolay.N.Gorobets@univer.kharkov.ua

² Научно-производственное объединение «КВ-А-НТ»
61183 Украина, г. Харьков, ул. Дружбы Народов, д. 244

E-mail: cw-a-nt@max.net.ua

Для различных сельскохозяйственных культур определен способ выбора оптимального времени наблюдений и параметры сельскохозяйственной растительности, позволяющие с применением РСА космического базирования прогнозировать урожай текущего года с ошибкой не более 5%.

Введение

Точность прогноза по данным дистанционного зондирования урожая сельскохозяйственных культур текущего года зависит от точности выбора двух параметров – оптимального времени проведения наблюдений, обеспечивающих прогноз, и характеристик сельскохозяйственной растительности, специфичных для различных сельскохозяйственных культур, определяющих идентификационные признаки результатов зондирования, и в то же время коррелирующих с уровнем будущего урожая. Строго говоря, нахождение таких «передаточных» параметров для различных типов подстилающей поверхности и является основной задачей наземного обеспечения ДЗЗ.

Опыт синхронных с радиолокационными (РСА сантиметрового диапазона) аэрокосмическими съемками наземных исследований состояния сельскохозяйственных посевов совместно с многолетним опытом анализа различных параметров, не являющихся традиционными при агробиологическом описании сельскохозяйственной растительности, позволил разработать методику получения таких характеристик, которые полностью исключают трудоемкие синхронные наземные наблюдения и позволяют разработать компьютерные программы автоматизированного прогноза урожая. Апробация методики, давшая вполне надежный прогноз урожая злаковых и бобовых, была проведена на полигонах Харьковской (в сопровождении синхронных наблюдений) и Днепропетровской областей (без наземного обеспечения) Украины.

1. Выбор оптимального времени дистанционных исследований

Экономическая и организационная целесообразность диктует необходимость минимизации количества дистанционных наблюдений. Встает вопрос оснований определения такого времени их проведения, которое обеспечило бы продуктивное для прогноза урожая рассмотрение большинства видов сельскохозяйственных культур.

1.1. Характеристика средних многолетних состояний посевов

С этой целью разработана методика (М.Д. Атрошенко) установления генеральных параметров характеристик сцен земель сельскохозяйственного назначения во времени по средним многолетним температурам и видоспецифическим агробиологическим характеристикам различных видов сельскохозяйственной растительности.

Рассматриваются характерологические для климатических районов (по Б.П. Алисову [1]; выделяются на основе общности термического, влажностного и ветрового режимов) средние многолетние сроки перехода среднесуточных температур через 0, +5, +10 и +15 градусов Цельсия. На основании совместного анализа сроков перехода, почвенных характеристик климатического района, принятых в регионе агротехнических мероприятий и агробиологических свойств районированных на изучаемой территории разновидностей сельскохозяйственных культур устанавливаются по срокам средние многолетние характеристики сцен, как то: параметры шероховатости поверхности, проективное покрытие, объем, структурные характеристики и влагосодержание биомассы. Последний параметр легко пересчитывается в эффективные диэлектрические характеристики растений [2]. Прямыми наблюдениями установлено, что оптимальными сроками для зондирования сельхозугодий в целях прогноза урожая являются сроки достижения максимального проективного покрытия основными сельскохозяйственными культурами и минимальной общей шероховатости посевов. Для злаковых этот период соответствует середине периода выхода в трубку. Для бобовых (фасоль, соя) и технических (свекла) культур этот период соответствует периоду накопления максимальной надземной биомассы. Для таких широкорядных культур как подсолнечник, кукуруза и узкорядных как гречиха условиям максимального проективного покрытия и минимальной общей шероховатости соответствует время накануне цветения.

Для большинства сельскохозяйственных культур Днепропетровской и Харьковской областей Украины оптимальные условия в среднем достигаются во второй декаде июня.

Учет отклонений от средних и определение срока дистанционного зондирования сельхозугодий

Ход длины светового дня представляет собой несколько искаженную прецессией земной оси синусоиду. Считая день весеннего равноденствия за начало отсчета ($n=0$), в целях настоящего исследования длину светового дня для не високосного года достаточно описать следующим образом:

$$t = A(\varphi) \sin \frac{2\pi n}{365},$$

где $A(\varphi)$ - известная функция широты φ . Для високосного года делитель, понятно, равен 366. Ход средних многолетних температур T связан с длиной светового дня t соотношением

$$T = kt(n + n_0) + T_0,$$

где k , n_0 и T_0 - характерологические для климатических районов константы, изредка имеющие также и небольшие топоспецифические отклонения.

Практика показывает, что в целях решения поставленной задачи точности такого моделирования вполне достаточно.

По данным NOAA строится кривая отклонений текущих среднесуточных температур от средних многолетних. При планировании времени наблюдений вычисляется алгебраическая сумма S интегралов под и над кривой отклонений, начиная со среднего многолетнего времени перехода температур через 0°C до $n = 100$, считается количество m переходов этой кривой через 0. В зависимости от величины m от срока средней многолетней даты начала выхода озимых в трубку (реперная дата) отнимают (при положительном значении S) либо прибавляют к нему (при отрицательном) от 1 до 7 дней на каждые 250 (град·сутки). Чем больше переходов, тем на меньшее количество дней сдвигается срок. Так, например, для случая, представленного на рис. 1, рассчитываемая дата сдвигается влево от реперной на неделю.

Затем к полученному сроку прибавляют $7 \div 10$ дней. Как показали наши многолетние исследования, полученный таким образом срок, который совпадает со серединой периода выхода зерновых в трубку, определяет время минимальной шероховатости поверхности большинства посевов (если не принимать во внимание стеблей злаковых) и максимального проективного покрытия. В это период растения потребляют большое, многие - максимальное за период своего развития количество влаги. Режим ее потребления с одной стороны во многом определяет уровень будущего

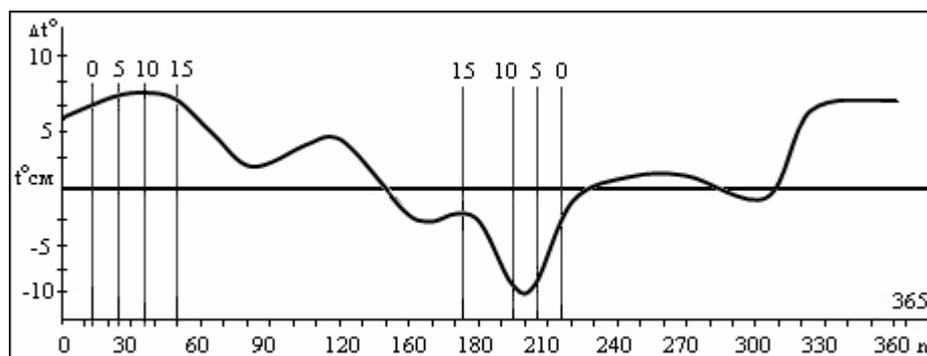


Рис. 1. Отклонение Δt° текущих среднесуточных температур от средних многолетних $t_{см}^\circ$

урожаю, а с другой - сильно сказывается на тургаре фитоэлементов. В отсутствие последующих природных катаклизмов (резкая засуха, полегание посевов из-за ливней, града) дистанционная диагностика большинства посевов в этот срок может служить основой для надежного прогноза урожая. В случае же наступления какого-либо из упомянутых явлений необходимо провести еще один сеанс ДЗЗ, оконтурить территорию его влияния и степень поражения посевов с целью уточнения прогноза.

2. Оконтуривание полей и распознавание типов сельскохозяйственной растительности

На территории Украины поля чаще всего имеют форму, приближенную к прямоугольной или, по меньшей мере, ограничиваются линеаментами. В свою очередь, указанные линеаменты имеют природу, существенно отличающуюся от основной: чаще всего это лесополосы (которые в силу значительного перепада высот образуют в зависимости от угла визирования либо радиолокационную «тень», либо сравнительно с основной территорией значительно большие амплитуды РЛ сигнала, т.е. служат своеобразными «уголковыми отражателями») и дороги (которые значительно отличаются по параметрам шероховатости и диэлектрическим характеристикам). Таким образом, в подавляющем большинстве случаев задача оконтуривания полей сводится к задаче выделения на РЛ снимке линеаментов.

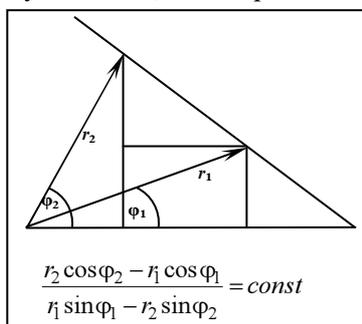


Рис. 2. Выделение линеаментов с заданной ЭПР на РЛ снимке

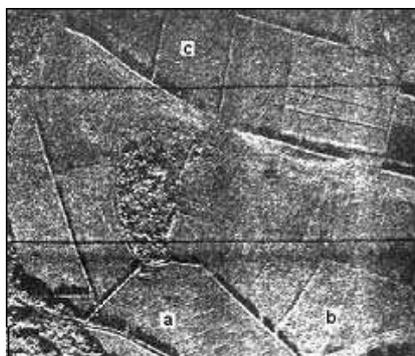


Рис. 3. РЛ снимок сельхозугодий. а) злаковые; б) подсолнечник; с) бобовые

Математически (да и в смысле программного обеспечения) эта задача не представляет трудностей. Геометрия ее решения показана на рис. 2. Таким образом идентифицируется большая часть границ полей. Остальные границы устанавливаются по скачку амплитуды радиолокационного отклика. Особенность применения этого простого метода состоит в том, что кроме границ полей выделяются и другие линеаменты. Природа их происхождения заключается в существовании агротехнических мероприятий, проводимых на данных сельхозугодьях и зачастую несет в себе дополнительную информацию. В частности, с использованием этого факта удается выделить поля, расположенные на наклонных поверхностях и уточнить их площадь. Рассмотрим сказанное на примере фрагмента радиолокационного снимка (рис.3), полученного с самолета лаборатории ИРЭ РАН (визуализированные РЛ данные, полученные с КА не так наглядны). Как видно, поля делятся на две категории: на одних текстура однородна и диффузна, на других четко просматриваются ярко выраженные линеаменты. Первые - это поля со сплошным проективным покрытием (в данном случае - бобовые и подсолнечник), вторые - поля со злаковыми культу-

рами, проективное покрытие поверхности почвы которых фитоэлементами не достаточно для того, чтобы экранировать структурные неоднородности почвы, появившиеся в результате вспашки ее загонным методом, при котором многосекционные плуги (рис. 4-а) движутся гонами, конфигурация, периодичность которых и результирующие модальные углы наклона конкрементов почвы показаны на рис. 4-б. Линеаменты внутри полей и представляют собой радиолокационный отклик

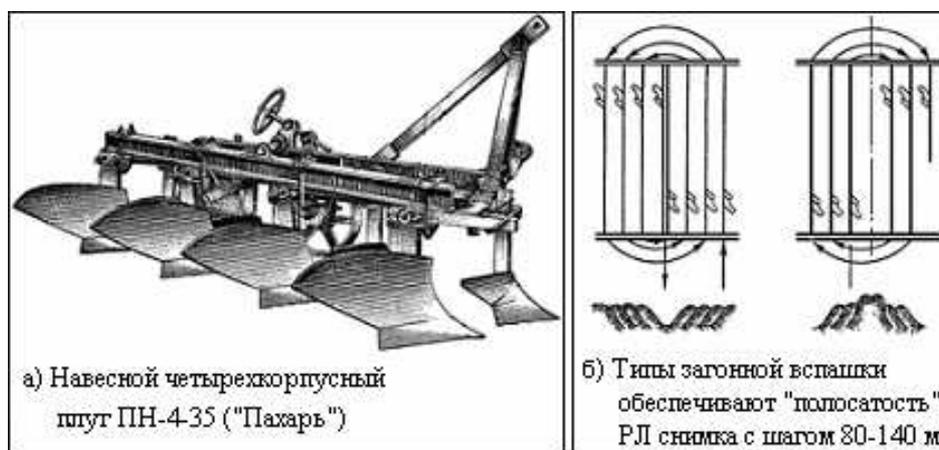


Рис. 4. Происхождение линеаментов на РЛ снимках полей злаковых культур

на границы загонов. Расстояние между этими границами по всей площади поля равны (обычно 80 - 140 м). На радиолокационных снимках из космоса эти линеаменты так же надежно идентифицируются. Незлаковые культуры достоверно распадаются на классы по совокупности текстурных признаков $\nu = \frac{\mu_1^2}{\mu_2}$ и $\chi = \frac{\mu_1}{\sigma}$, где σ - среднеквадратичное отклонение, μ - моменты.

3. Метод прогнозирования урожая

Агробиологические методы прогнозирования урожая широко известны: используются корреляции с температурно-влажностной предысторией посевов, почвенно-климатическими условиями их произрастания и т.д. Опытный же специалист-аграрник в указанный период точно определяет для каждой из культур отклонения будущего урожая от средних многолетних для температурно-влажностной предыстории текущего года по тургару листовых пластин, который далеко не всегда коррелирует с их объемным влагосодержанием.

В связи с этим нами был проведен анализ урожаев пшеницы (яровой и озимой) и сои в Украине за период с 1951 по 2007 гг. в сопоставлении с погодными условиями каждого из этих лет. Года были объединены в группы по признаку схожих погодных условий. Рассматривались характеристики:

$\alpha = \frac{S}{m+1}$ и $\beta = \frac{V}{k}$, где V - сумма осадков за указанный период, k - количество прошедших дождей. Весь диапазон каждой из рассматриваемых характеристик разбивался на пять классов (по нисходящим значениям α). Поскольку матрица такого разбиения получается фактически диагональной, в итоге получены пять групп погодных условий по 8-12 лет в каждой. Для каждой из них по областям по данным статуправления рассчитывался средний многолетний урожай изучаемых культур. По Днепропетровской области по состоянию на 1991 год для лет, соответствующих III классу погодных условий (как и 1991 год), этот показатель составил 22 и 13 ц/га для озимой и яровой пшеницы соответственно и 20 ц/га для сои.

В ходе наблюдений 1987÷1991 годов был проведен большой объем работ по изучению высоты элементов сельскохозяйственной растительности и конкрементов почвы. Измерения проводились методом построения профилограмм (отвес на горизонтальной штанге) *in situ*. Типичный вид профилограммы посева яровой пшеницы приведен на рис. 5. Было установлено, а затем подтверждено наблюдениями 1992÷2007 годов, что распределения плотности вероятности высот расположения фрагментов фитоэлементов и почвы для изучаемых культур имеют вид, приведенный

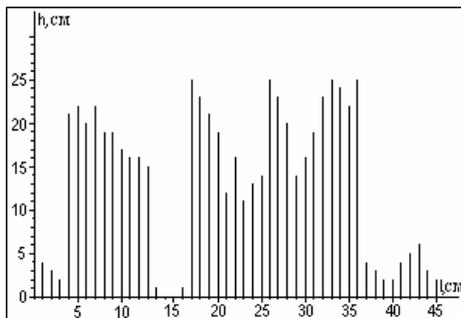


Рис. 5. Профилограмма посева яровой пшеницы *in situ*

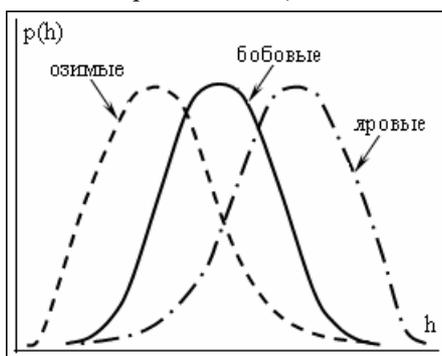


Рис. 6. Плотности вероятности распределения высот профилограмм, идентичные $p(\sigma)$

на рис. 6. В то же время, как показал анализ результатов дистанционного зондирования посевов, плотность вероятности величин их ЭПР имеет аналогичные параметры. В прямом сопоставлении на 32 полях озимой пшеницы, 27 полях яровой и на 17 полях сои характеристик распределений результатов ДЗЗ 1991 г. и полученных синхронно профилограмм выявлено соответствие параметров указанных распределений на уровне $p > 0,98$ для РСА самолетного базирования и $p > 0,95$ - космического. Таким образом, параметры распределений высот фрагментов фитоэлементов *in situ* (подчеркнем: не высоты растений или длины фитоэлементов, а высоты точки, где отвес касается фитоэлементов и почвы) служат надежным идентификационным признаком посева.

Параметры профилограмм характеризуют как сами культуры, так и тургар их листьев. Прежде всего обращает на себя внимание различия в асимметрии плотности вероятности распределений высот озимых и яровых посевов. Это хорошо согласуется с агробиологическими отличиями этих культур. От других злаковых яровая пшеница отличается наиболее слабой энергией кущения. Ее общая кустистость составляет $1 \div 2,5$ в то время как озимая пшеница при благоприятных условиях образует 3-4, а иногда и до 8 стеблей на одном растении [3].

При слабом тургаре распределения сглаживаются, при хорошем, напротив, дисперсия уменьшается. В литературе нам не встретилось геометрических характеристик состояния тургара растений *in situ*. По мнению же специалистов - практиков,

именно этот показатель коррелирует с будущим урожаем (что и понятно из общих соображений: крепкое растение – крепкий плод). На начальном этапе исследования с привлечением опытейшего специалиста-аграрника (М.Д. Атрошенко) тургар определялся органолептически как «слабый, слабоватый, средний, хороший, отличный». Параллельно так же оценивался будущий урожай. Это побудило нас провести сравнительный анализ параметров распределения высот профилограмм (как мы уже сказали, обнаруживающих надежную корреляцию с параметрами распределений амплитуды ЭПР по анализируемой площади) с этой пятибалльной шкалой оценки тургара и урожаями тех же годов с целью поиска корреляций между будущим урожаем и параметрами ДЗЗ.

В течение периода, близкого к дню летнего солнцестояния, в 1991 г. было проведено несколько сеансов радиолокационного зондирования РСА сантиметрового диапазона с борта самолета – лаборатории ИРЭ РАН в серии заходов, сопровождаемых полным комплексом синхронных наземных наблюдений (Харьковская обл.).

Исследования на 22-х полях показали, что искомая корреляция с данными РСА самолетного базирования существует и достоверна на уровне $p > 0,98$.

После обработки результатов дистанционных и наземных наблюдений была получена номограмма расчета отклонений урожая текущего года от среднего многолетнего урожая годов с аналогичными текущему погодными характеристиками по характеристикам радиолокационного изображения (с предварительным применением всех описанных выше процедур).

23 июня 1991 г. в Харьковской области с привлечением синхронных наземных наблюдений и 18 июня 1991 г. в Днепропетровской области без наземного сопровождения была проведена съемка сельскохозяйственных угодий РСА, базировавшемся на КА «Алмаз». Для обеих областей с применением изложенных выше результатов произведено прогнозирование урожая. Сопоставление исследуемых параметров на материалах Харьковской области (те же поля, что и в предыдущем случае) проводилось с целью уточнения деталей методики обработки дистанционных и наземных результатов и достижения максимального совпадения прогнозных данных с реальным урожаем. Сведения об урожае получались в хозяйствах непосредственно в период сбора урожая (до завершения обработки результатов наблюдений), причем сотрудники присутствовали в весовой и ими независимо записывались данные весов и фиксировались потери зерна

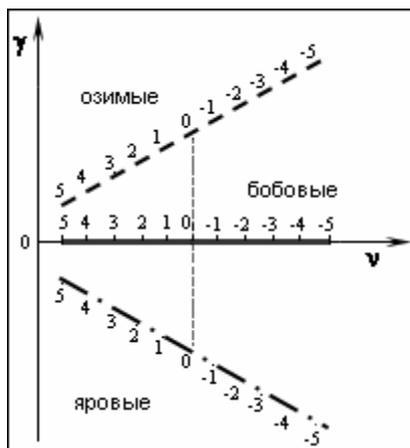


Рис. 7. Номограмма отклонений урожая этого года от среднего многолетнего в

зависимости от величин γ и $\nu = \frac{\mu_1^2}{\mu_2}$

при перевозке и другие факторы, способные повлиять на итоговый результат данных весовой. Упомянутая номограмма была уточнена для случая космической съемки. Итоговый ее вид приведен на рис.7 (γ - коэффициент асимметрии, μ - момент соответствующего индексу порядка). Таким образом, для Харьковской области, естественно, было получено практически полное совпадение прогноза и фактического урожая. В Днепропетровской же области проводилась апробация полного варианта методики: радиолокационная съемка проходила в расчетный срок без наземного сопровождения. Более того, группа наземного обеспечения ДЗЗ даже не была осведомлена о ее проведении. В ноябре того же года данные расчетов урожая были сопоставлены с данными журнала весовой

хозяйства, которому принадлежали поля. Данные сопоставления приведены в таблице.

Таблица. Данные прогноза и полученного урожая (по сведениям весовой), ц/га

Культура		1	2	3	4	5	Среднее многолетнее
Озимая пшеница	прогноз	19	19	18	19	20	22
	урожай (по данным весовой)	17,5	18,0	16,8	17,8	18,3	
Яровая пшеница	прогноз	16	16	17	17	18	13
	урожай (по данным весовой)	15,5	15,5	16,5	16,8	17,3	
Соя	прогноз	23	26	25	24	25	20
	урожай (по данным весовой)	21,5	25,3	24,0	22,5	23,5	

Видно, что прогноз оправдался с погрешностью, не превосходящей 5%, причем данные весовой всегда ниже прогнозных.

Таким образом, с использованием описанной методики на полях Днепропетровской области получен вполне удовлетворительный прогноз урожая пшеницы и сои. Изложенная методика может служить основой для разработки технологии прогноза урожая сельскохозяйственных культур по данным РСА.

В заключение авторы выражают глубокую признательность Борису Георгиевичу Кутуза, Анатолию Анатольевичу Калинкевичу и Леону Богуславовичу Неронскому за организацию и проведение серии радиолокационных исследований и коллективу Харьковского национального аграрного университета за организационную помощь в обеспечении наземного сопровождения ДЗЗ.

Литература

1. Алисов Б.П., Полтараус Б.В. Климатология. М.: Изд-во МГУ, 1974. 300 с.
2. Atroshenko L.M., Gorobets N.N., and Safronova L.P. Complex Permittivity of Disperse Heterogeneous Systems and Their Components. Telecommunications and Radio Engineering 2006, Vol. 65, No. 10, pp. 873-884.
3. Основы агрономии. Под ред. Атрошенко М.Д. // М.: «Колос», 1978. 320 с.