

УДК 631.54:631.6

## **СВЯЗЬ УРОЖАЙНОСТИ С ТЕПЛОВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТЬЮ ПО ФАЗАМ РАЗВИТИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР**

**Е.И. Волкова**, заведующая отделом  
Институт мелиорации и луговодства НАН Беларуси

**Ключевые слова:** урожайность, модели прогнозирования урожайности, зерновые культуры, фазы развития сельскохозяйственных культур

### **Введение**

Известно, что существенными факторами формирования урожая являются осадки и температуры. В республике с апреля по октябрь в каждом пункте наблюдаются 3-4 опасных для растений бездождных периода. Опасный дождь наблюдается примерно 7 раз в 2 года. По мнению авторов [1], на долю погоды приходится 44-55% общей амплитуды колебаний урожайности. В [2] приведены данные о распределении засух на нашей территории: каждые 4 года из 10 (43% лет) отмечаются засушливые явления, которые в большинстве из этих лет охватывают до четверти площади республики. Не подлежит сомнению, что урожайность подвержена колебаниям из-за изменчивости погодных явлений. Поэтому актуальным является всемерный учет влияния метеоусловий на урожайность сельскохозяйственных культур.

Влияние тепла, водного режима на рост, развитие культур и конечный урожай неоднозначно. Каждый отдельно взятый период вегетации вносит свой вклад в формирование урожайности, и этот вклад зависит и от предшествующих периодов, и от состояния растений, и от действия других факторов [3].

Влияние метеоусловий на урожай исследовалось многими авторами. Ряд публикаций посвящен регрессионным и корреляционным зависимостям урожая от факторов. Примером регрессионной модели могут служить опубликованные в [4] формулы связи урожая картофеля и многолетних трав по Брестской области с влагозапасами, температурой воздуха, суммами осадков конкретных месяцев (апрель, май, август).

Для озимой ржи в районе Шатиловской опытной станции Орловской области (учеты урожая 1806-1999 гг.) неблагоприятно отсутствие сентябрьских и майских осадков. Обнаружена тесная связь между урожайностью озимой ржи и осадками во второй-третьей декадах мая и температурой воздуха в критический период – фазе выхода в трубку [5].

В [6] изложены методы оценки условий формирования озимой пшеницы и ярового ячменя. Авторы разработали шкалу оценки агрометеорологических условий формирования урожая озимой пшеницы в процессе ее вегетации, в которой в процентах даны сте-

---

\* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук А.П.Лихацевича

пени влияния факторов на обеспеченность получения формируемого урожая, и представили формулу, согласно которой влияние факторов в течение вегетации суммируется.

В [7] рассматривается роль температуры воздуха и осадков в формировании урожая озимой пшеницы, ярового ячменя и кукурузы. В. П. Дмитренко указывает, что «оптимум того или иного элемента, присущий каждому периоду вегетационного цикла, можно рассматривать как самостоятельный показатель, независимый от предшествующих условий, в связи с тем, что растения в онтогенезе способны к адаптации и саморегулированию. Так, посевы озимых при неблагоприятных условиях в период посев - всходы оказываются изреженными, однако при оптимальных условиях в последующие периоды растения могут возместить в какой-то мере этот недостаток путем усиленного кушения и образования большего числа побегов. Неблагоприятные осенние и зимние условия нередко вызывают значительную изреженность и гибель растений и побегов. Но оптимальные термический, водный, световой и пищевой режимы весной при сохранившемся конусе нарастания способствуют образованию новых побегов и усилению плодоношения».

Ряд работ посвящен моделям формирования урожайности [8-11 и др.].

Предложены критерии для оценки условий тепло- и влагообеспеченности. Они могут применяться как для всего вегетационного периода, так и для отдельных месяцев, декад, фаз развития растений. В частности, Г. Т. Селяниновым предложен комплексный показатель, представляющий отношение сумм выпадающих осадков к суммам активных температур.

М. И. Будыко выдвинул принципы физической климатологии применительно к разработке агроклиматических показателей. Показатели для оценки и районирования предложили Иванов Н. Н., Шашко Д. И., Педь Д. А. и другие исследователи.

Данная проблема активно изучается в настоящее время и вызывает живейший интерес в нашей республике [12]. Проведен значительный объем исследований по повышению урожайности зерновых культур. В последние годы совершенствуются технологии выращивания и внедряются в производство более урожайные культуры и сорта. Применяются методы прогноза урожая, составляемые в период вегетации растений, основанные на учете состояния посевов и сложившихся метеорологических условий, которые оцениваются скорее качественно, чем с помощью точных моделей. Показателями состояния посевов служит густота продуктивных стеблей на 1 м<sup>2</sup>, высота растений, число колосков в колосе, масса 1000 зерен и другие, для оценки агрометеорологических условий обычно используются запасы влаги к моменту сева либо в отдельные межфазные периоды, температура воздуха и количество осадков в наиболее важные отрезки вегетации растений, часто применяются различные сочетания указанных метеозаказов, а также дефицит влажности воздуха для характеристики условий испарения влаги с почвы и листовой поверхности. При наличии года-аналога сведения по нему также используются при составлении прогноза.

На основании закона лимитирующего фактора и знания требований растений к факторам в конкретные фазы можно разработать поэтапную модель учета влияния факторов и прогнозирования урожая сельскохозяйственной культуры на основе данных по температуре, осадкам и влажности почвы, которая позволит существенно дополнить и уточнить применяющиеся в настоящее время в республике виды прогнозов. Наши исследования направлены на решение конкретной задачи: изучение закономерностей влияния метеоусловий на продукционный процесс растений по фазам их развития и поиск оптимальных параметров основных факторов по фазам развития.

Подходить к изучению факторов роста и развития культур следует базируясь на знании законов земледелия, которые являются отражением законов природы. Они раскрывают связи растений с условиями внешней среды и определяют пути развития земледелия с учетом основных законов.

Закон равнозначности и незаменимости факторов жизни растений требует непрерывного обеспечения растения всеми факторами в оптимальном количестве.

Закон минимума (лимитирующего фактора) – при оптимальных прочих условиях уровень урожая определяется тем фактором, который находится в минимуме.

Сложность в том, что из-за быстрой переменчивости погодных условий и повышенных требований растений в конкретные фазы развития в качестве лимитирующих выступают разные факторы, причем лимитирующие факторы могут быстро сменяться.

Закон совокупного действия факторов жизни растений означает, что изменения одного фактора влекут изменения степени влияния других факторов. Данный закон меньше всего поддается формализации ввиду большого количества внутренних и внешних факторов, влияющих на рост и развитие растений. В научной литературе можно встретить множество моделей совместного влияния факторов, среди которых есть аддитивные и мультипликативные.

В основе закона плодосмена лежит общебиологический закон единства и взаимосвязи растительных организмов и условий среды.

Согласно закону возврата питательных веществ, почва должна получать обратно все, что у нее взято. Согласно закону прогрессивного роста эффективного плодородия, почва должна с избытком получать обратно все у нее забранное.

Основополагающим в земледелии является положение: если комплекс условий среды находится в оптимуме, то растения образуют максимум урожая. Отклонение какого-либо элемента от оптимума уменьшает урожай пропорционально этому отклонению в соответствии с законами минимума ограничивающих факторов [13].

Опираясь на базовые законы и положения, реализован следующий подход: любая сельскохозяйственная культура в процессе естественного или искусственного отбора выработала свои требования к условиям окружающей среды; для культуры характерен определенный диапазон фактора, в пределах которого действие фактора будет благо-

приятным, оптимальным. Исходный потенциал растения заложен в его семени. Качество семенного материала определяет потенциал продуктивности сельскохозяйственной культуры. Конечный урожай формируется в течение вегетации, когда растение последовательно проходит определенные фазы развития и накапливает результаты реакции на изменяющиеся условия окружающей среды [14].

Рассмотрим, например, взаимосвязь с осадками. Кривая связи урожайности с осадками в конкретную фазу имеет три кардинальных точки. Минимуму осадков соответствует минимум продуктивности. Биологический оптимум осадков способствует максимальной продуктивности растений. Максимум осадков приводит к падению продуктивности. Аналогично и для связи урожая с температурами. Кривые связи урожайности с температурами и осадками имеют криволинейный вид, часто, но не всегда близкий к параболе, и могут быть представлены в виде формул коэффициента продуктивности температуры воздуха и осадков [7, 14]. Какую бы фазу развития растения мы ни рассмотрели, в ее пределах каждый фактор характеризуется своим оптимальным для культуры значением и отклонениями от оптимального значения, которые мы наблюдаем чаще всего. В случае неоптимальности фактора (факторов) урожай следует ожидать, как правило, ниже. Зависимость урожая от двух факторов графически представляет собой поверхность.

Формирование конечного урожая происходит от одной фазы к другой, и для каждой фазы характерны свои оптимальные и неоптимальные значения фактора. Каждый последующий период влияния фактора зависит от всех предшествующих. Агрометеорологические условия следует рассматривать как по отдельным периодам вегетации культур, так и в целом за вегетационный период. При таком подходе создается возможность определить благоприятные и неблагоприятные по тепловлагообеспеченности периоды вегетации, т.е. более объективно представить изменения при формировании урожая.

#### **Объекты исследования**

В качестве объектов для исследований воздействия погодно-климатических факторов на межгодичную изменчивость урожаев взяты зерновые культуры. Исследовались данные по урожайности ярового тритикале и других зерновых культур на опытных полях Полесской опытной станции мелиоративного земледелия и луговодства, метеоданные за многолетие по станции Полесская, полученные Н.Н. Семененко, Н. М. Авраменко и А. И. Барсуковым. Фактор тепла оценивался по сумме среднесуточных температур. Фактор влаги оценивался по влажности, влагозапасам и осадкам.

#### **Содержание исследований**

Выделить фазы развития растений, для каждой фазы подсчитать суммы среднесуточных температур, осадки, продуктивные влагозапасы.

Далее определить степень и форму влияния факторов в каждую фазу. На этом этапе для анализа можно использовать и эмпирико-статистические методы, и регрессионные уравнения.

**Результаты, обсуждение**

На основании изученных данных по урожайности за 2001-2005 гг. получены следующие закономерности (см. таблицу).

**Зависимости урожайности ярового тритикале от факторов тепла и влаги в конкретные фазы развития растений**

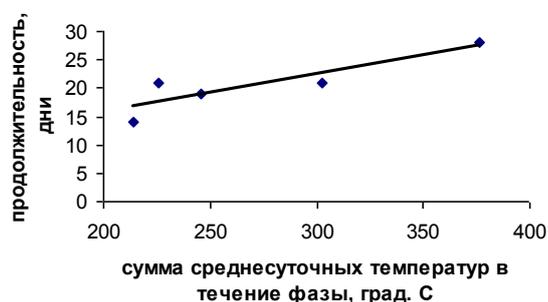
Фаза развития	Вид связи
Посев – 3 листа	Прямая* связь урожайности с влагозапасами в слое 0-50 см перед посевом
	Прямая связь урожайности с изменением влагозапасов в течение фазы
	Обратная* связь с показателем «сумма среднесуточных температур, деленная на сумму осадков»
3 лист – конец кущения	Прямая связь урожайности с влагозапасами в слое 0-50 см
	Прямая связь урожайности с суммой среднесуточных температур
	Прямая связь продолжительности периода с суммой среднесуточных температур для варианта с внесением удобрений
	Прямая связь урожайности с продолжительностью периода
Конец кущения – флаговый лист	Прямая связь урожайности с суммой среднесуточных температур
	Прямая корреляция с показателем «сумма среднесуточных температур, деленная на сумму осадков»
	Засуха значительно снизила урожай
Флаговый лист – колошение	Прямая связь с влагозапасами в слое 0-50 см
Все фазы в сумме	Прямая, приближающаяся к параболе, связь урожайности с продолжительностью вегетационного периода, для контрольного варианта – связь в виде параболы

\* Прямая связь означает, что с ростом значений фактора возрастает урожайность, обратная связь – с ростом значений фактора урожайность уменьшается.

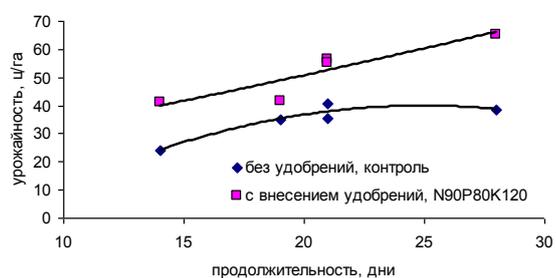
Распространено мнение о том, что скорость развития растений зависит от эффективной температуры, и как только накопится сумма эффективных температур, необходимая определенному виду и сорту растений для вступления в очередную фазу, растение перейдет в другую фазу (по А. А. Щиголеву). Однако в литературе приводятся сведения о нарушении этой тенденции. Положение о том, что накопив сумму температур, растение перейдет к следующей фазе, требует уточнений.

Согласно [7], низкие температуры обуславливают очень медленное образование органического вещества. Высокие температуры способствуют очень большим скоростям развития, и полноценное органическое вещество не успевает образоваться в достаточном количестве. Если же температура соответствует гармоническому оптимуму, то образуется наибольшее количество полноценной продукции.

Анализ зависимости продолжительности фазы «3 лист – конец кущения» зерновых культур от температур (рис. 1) свидетельствует о том, что с накоплением конкретной суммы температур растения не обязательно переходят в следующую фазу, при благоприятных условиях фаза продлевается. Если тепло и много осадков, продолжительность фазы кущения возрастает, если жарко и мало осадков – уменьшается, если холодно и осадков хватает, то продолжительность фазы также должна увеличиваться. По нашему мнению, должен быть оптимум сочетания двух факторов: осадков и температур.



**Рис. 1. Зависимость продолжительности периода "3 лист - конец кущения" от сумм среднесуточных температур за тот же период**



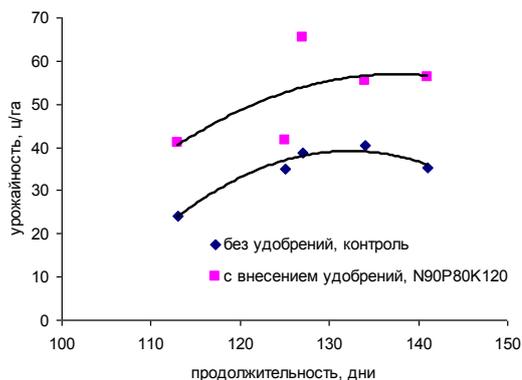
**Рис. 2. Зависимость урожая ярового тритикале от продолжительности фазы "3 лист - конец кущения"**

Осадков должно быть столько, чтобы их количество соответствовало температурам. А на рис. 2 представлена зависимость урожайности ярового тритикале от продолжительности фазы «3 листа – конец кущения».

Характер зависимостей в течение вегетации меняется. Они бывают прямые и обратные. Наблюдается также тенденция получения более высоких урожаев в годы с длинным вегетационным периодом. Большие продолжительности фаз, дающие в сумме более длинный вегетационный период, характерны для лет с высокими урожаями зерновых. Растения успевают больше накопить солнечной энергии. Например, по [15], 2004 г. в республике характеризовался благоприятными погодными условиями, и сроки массовой уборки были смещены на август. По мнению автора, поздняя уборка зерновых – надежный диагностический признак урожайности года. К примеру, 1987 – самый урожайный год за всю историю Беларуси, тогда республика собрала 8,2 млн. т зерна, начало массовой уборки (т.е. 5% убранной площади) отмечено 5 августа.

В литературе встречается много данных о влиянии сроков сева яровых на урожайность. Часто приводится такая тенденция: чем раньше сев, тем больше урожай. Однако ранние сроки сева способствуют удлинению вегетационного периода. На увеличении урожая, возможно, сказывается, в том числе, удлинению вегетационного периода.

Продуктивность растений определяется притоком ФАР и коэффициентом использования ее на фотосинтез. Культурные растения используют лишь незначительную



**Рис. 3. Зависимость урожаев ярового тритикале от продолжительности вегетационного периода (посев-созревание) \***

часть ФАР – 0,5-2 %. Этот показатель может повышаться при использовании более интенсивных и высокоурожайных сортов сельскохозяйственных культур и при создании оптимальных условий для их роста [13]. Солнечный свет – один из факторов, который дает растениям необходимую энергию для создания органического вещества в процессе фотосинтеза. Растение стремится полнее использовать энергию солнца. Если создаются оптимальные условия, то оно будет дольше находиться в каждой фазе, чтобы накопить больше энергии. То есть растения, как и все живое, не стремятся быстрее прожить свой век, а нацелены более продуктивно просуществовать на земле, накопив больше энергии и вещества. Если факторы жизни не в оптимуме, например, температуры высокие, а влаги нет, то растение будет стремиться сохранять энергию для формирования полноценного зерна. Природа нацелена на максимальное использование солнца в случае оптимальности факторов, меньшее, но адекватное использование солнца в случае неоптимальности факторов, или на формирование полноценного зерна при неблагоприятных условиях, чтобы в следующий вегетационный период все начать сначала. Накопление сумм температур, а целый комплекс факторов приводит к следующей фазе.

Результаты других авторов свидетельствуют об аналогичных выводах.

Например, в [16] описаны корреляционные зависимости урожайности озимых зерновых от определяющих факторов, в том числе от метеоусловий. Установлена криволинейная зависимость (полином второй степени) урожайности озимых пшеницы, тритикале и ячменя от температуры воздуха и осадков периода весенне-летней вегетации. Продолжительность фаз развития и вегетационного периода всех озимых зерновых культур в наибольшей мере зависела от метеорологических условий. Полевая всхожесть семян варьировала, в основном, в зависимости от метеорологических условий, нормы высева и глубины заделки их в почву. Общая и продуктивная кустистость растений озимых зерновых культур – весьма динамичные показатели, которые характеризуются большей величиной в условиях пониженной относительно средней многолетней температуры и доста-

\* Рисунки 1-3 выполнены по данным Н.Н.Семеновко, В.А.Журавлева.

точного обеспечения влагой. Густота продуктивного стеблестоя озимых зерновых культур является интегральным показателем от нормы высева, полевой всхожести, продуктивной кустистости и сохраняемости растений к уборке. Формирование элементов продуктивности колоса (число зерен в колосе, масса 1000 зерен) зависит от всех предыдущих показателей (положительная и отрицательная корреляция с ними) и питательного режима.

В [16] также отмечено, что урожайность зерна имеет тесную прямую корреляцию с величиной фотосинтетически активного потенциала за вегетационный период. Озимые культуры имеют высокий потенциал утилизации фотосинтетически активной радиации солнца урожайностью зерна. По этому показателю первое место в среднем для Витебской области занимает озимое тритикале (138,75 ГДж/га), затем следуют ячмень (125,7), озимая рожь (120,11), озимая пшеница (114,4). Биоэнергетические коэффициенты урожайности для северной Беларуси: озимое тритикале 3,02, ячмень – 2,8, рожь – 2,6, пшеница 2,49.

### **Заключение**

Выявленные закономерности должны послужить отправной точкой для разработки модели учета влияния факторов и прогнозирования урожая сельскохозяйственных культур на основе данных по температуре, осадкам и влажности почвы, которая дополнила и уточнила бы применяющиеся в настоящее время в республике виды прогнозов. Это позволит снизить ущербы от неблагоприятных условий погоды, повысить стабильность урожаев и продуктивность зерновых культур.

Предложенный анализ может оказать существенную помощь при уточнении технологического регламента выращивания зерновых культур.

### **Выводы**

1. Установлены зависимости урожайности ярового тритикале от сумм среднесуточных температур, сумм осадков и продуктивных влагозапасов по фазам развития растений.
2. Влияющие на урожайность факторы и характер их воздействия изменяются по разным фазам.
3. Тенденция увеличения продолжительности вегетационного периода характерна для лет с высоким урожаем зерновых.
4. Продолжительность фаз развития зерновых зависит не только от накопления сумм температур, а от целого комплекса факторов.

### **Литература**

1. Гольберг М.А., Волобуева Г.В., Фалей А.А. Опасные явления погоды и урожай. – Мн: Ураджай, 1988. – 120 с.
2. Стихийные гидрометеорологические явления на территории Беларуси. – Мн.: Белорусский научно-исследовательский центр «Экология», 2002. – 131 с.
3. Шашко К. Г. К вопросу стабильного повышения урожайности зерновых культур в Белоруссии. / Земледелие и растениеводство в БССР. – Вып. 30. – Мн.: Ураджай, 1986. – С. 57.
4. Босак В. Н., Волчек А. А., Шпендик Н. Н. Связь агроклиматических показателей с урожайно-

- стью картофеля и многолетних трав в Брестской области. // Почвоведение и агрохимия. – 2005. – №1(34). – С. 176-179.
5. Небытов В. Г., Коломейченко В. В. Урожайность зерновых в зависимости от погодных условий и удобрения. // Земледелие. – 2005. – №2. – С. 24-25.
  6. Свислук И. В., Русеева З. М., Федотова Л. В. Погода и урожай зерновых культур. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 228 с.
  7. Дмитренко В. П. Оценка влияния температуры воздуха и осадков на формирование урожая основных зерновых культур. Методическое пособие. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 48 с.
  8. Полевой А. Н. Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 320 с.
  9. Тооминг Х. Г. Солнечная радиация и формирование урожая. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 200 с.
  10. Ковалев В. М. Теория урожая. – [http://library.timacad.ru/sources/electr\\_izd/kovalev/](http://library.timacad.ru/sources/electr_izd/kovalev/)
  11. Бакаленко Б. И., Голубев С. В. Долгосрочное прогнозирование темпов фенологического развития сельскохозяйственных культур. // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2006. – №2. – С. 18-20.
  12. Сачок Г. И., Камышенко Г. А. Факторы и модели изменчивости урожайности сельскохозяйственных культур в Беларуси. – Мн.: Белорусская наука, 2006. – 244 с.
  13. Земледелие: учебник. / В. В. Ермоленков и др. Под ред. В. В. Ермоленкова, В. Н. Прокоповича. – Мн.: ИВЦ Минфина, 2006. – 463 с.
  14. Лихацевич А. П., Карнаухов В. Н. Модель динамики урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от изменчивости природно-климатических факторов. // Мелиорация переувлажненных земель. – 2005. – № 2(54). – С. 108-117.
  15. Аналитическая информация на 2 августа о ходе формирования урожая, состоянии посевов, прогнозе урожайности (валовых сборов) и необходимых мерах по реализации прогнозных показателей в 2004 году. Составитель: Шашко К. Г. Институт земледелия и селекции НАН Беларуси. – <http://mshp.minsk.by/arekomendacii/zs/a-urojay2004.doc>
  16. Голуб И. А. Научные основы формирования высокой урожайности озимых зерновых культур. Автореф. на соиск. учен. степ. д-ра с.-х. наук. – Горки, 1997. – 32 с.

### **Summary**

#### **Volkova E. COMMUNICATION OF PRODUCTIVITY WITH THERMAL AND WATER MODES ON PHASES OF DEVELOPMENT OF AGRICULTURAL CROPS**

Value of influence of variability of weather conditions on fluctuations of a crop of agricultural crops is certain. The analysis of available publications and results according to influence of factors on productivity of agricultural crops is resulted. Methods of forecasts of the productivity, applied in republic now are described. It is necessary to develop stage-by-stage model of the account of influence of factors which would add kinds of forecasts applied in republic for specification of applied methods of forecasts. In clause laws of influence of meteorological conditions on process of growth and development of plants are described. That duration of the vegetative period is characteristic for years with a high grain yield is specified. Duration of phases grain depends not only on accumulation of the sums of temperatures, but from the whole complex of factors.

*Поступила 4 июля 2006 г.*