

УДК 631.524.84 : (633.2 + 633.11)

ВЛИЯНИЕ ВЛАГОТЕПЛООБЕСПЕЧЕННОСТИ НА УРОЖАЙНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

(НА ПРИМЕРЕ МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ И ЯРОВОГО ТРИТИКАЛЕ)

А.П. Лихацевич, чл.-кор. НАН Беларуси, доктор технических наук

Е.И. Волкова, заведующая отделом

РУП «Институт мелиорации»

Ключевые слова: яровое тритикале, урожайность, водный режим, теплолагообеспеченность, органо-минеральные почвы

Введение

К основным факторам жизни растений относятся: свет, воздух, тепло, влага, питание. Причем, наиболее доступными для активного регулирования являются водно-воздушный и пищевой режимы растений. В меньшей степени можно регулировать освещенность и теплообеспеченность.

Исследованиями установлено, что степень неблагоприятности внешних условий для растений связана с амплитудой отклонения каждого фактора от своего оптимального значения. Данную закономерность можно представить в обобщенной форме [1, 2]:

$$Y = Y_{\max} \prod_{i=1}^n (1 - f_i)^2 \quad (1)$$

где Y – урожайность сельскохозяйственной культуры;

Y_{\max} – максимальная урожайность при оптимальном обеспечении всеми факторами;

f_i – относительная величина i -го фактора (отношение фактической его величины к оптимальной);

n – число учитываемых факторов, влияющих на урожайность.

Предварительный анализ показал, что при отсутствии экстремальных проявлений (катастрофические заморозки, болезни, вредители и т.п.) формула (1) дает результаты расчета достаточно близкие к фактическим в диапазоне $(0,5-1,0)Y_{\max}$ [3]. Однако на полевом опытном материале, полученном в Беларуси, проверка (1) выполнена только по пищевому режиму [2, 3 и др.]. По другим факторам жизни растений адекватность модели (1) не проверялась. Восполним этот пробел, используя доступные нам материалы полевых исследований на опытных участках Полесской опытной станции мелиоративного земледелия и луговодства (ПОСМЗиЛ).

Объекты исследований

Для того, чтобы установить зависимость урожайности от влагообеспеченности растений, необходимо провести в течение нескольких лет полевой опыт с разными вариантами увлажнения. Подобный опыт был поставлен в условиях Белорусского Полесья в конце 70-х годов 20 века на торфяных почвах с применением орошения многолетних злаковых трав [4]. Почвы опытного участка – торфяные мелкозалежные. В корнеобитаемом слое (0-30 см) плотность сложения почвы варьировалась в пределах 0,2-0,3 г/см³, наименьшая влагоемкость составляла около 180 мм, влагозапасы завядания были в три раза ниже – около 60 мм [4, 5].

Схема опыта включала три варианта увлажнения: первый – естественное увлажнение, второй – поддержание почвенных влагозапасов с помощью дождевания в границах 70-100% от наименьшей влагоемкости, третий вариант учитывал при проведении орошения связь нижней границы увлажнения с теплообеспеченностью вегетационного периода. В табл. 1 приведены результаты исследований.

Таблица 1 – Влияние влаготеплообеспеченности вегетационных периодов на урожайность многолетних трав трехкосного использования на мелкозалежных торфяных почвах ПОСМЗил [4]

Год	Среднесуточная температура воздуха, средняя за вегетацию, °С	Влагозапасы почвы в слое 0-30 см, средние за период по вариантам, мм			Урожайность сухого вещества многолетних трав по вариантам, ц/га			НСР _{05ц} /га
		К	Д	Д _о	К	Д	Д _о	
1977	14,4	153	171	-	86,4	101,7	-	10,1
1978	13,8	108	141	153	59,1	73,3	81,2	9,2
1979	15,7	120	159	162	78,7	94,4	99,8	9,9

Примечания: К – естественная влагообеспеченность (контрольный вариант);
 Д – дождевание с целью поддержания почвенных влагозапасов в пределах 70-100% от наименьшей влагоемкости;
 Д_о – дождевание с учетом теплообеспеченности вегетационного периода.

Кроме представленного выше опыта на антропогенно-преобразованных почвах ПОСМЗил в 2001-2005 гг. изучалось влияние гидротермических условий на урожайность ярового тритикале. Автор и руководитель исследований профессор Н.Н. Семененко предоставил нам данные по водным свойствам почв опытного участка, в соответствии с которыми продуктивные влагозапасы в корнеобитаемом слое при влагонасыщении до наименьшей влагоемкости можно оценить примерно в 220 мм. Названный показатель и другие опубликованные результаты данного опыта [6] позволяют проверить правомочность использования функции (1) при оценке влияния влаготеплообеспеченности периодов вегетации на урожай ярового тритикале. При этом учтем, что почвенные влагозапасы и среднесуточные температуры воздуха могут анализироваться за весь вегетационный период или за некоторый особо ответственный отрезок вегетации, называемый критическим периодом (табл. 2).

Таблица 2 – Влияние гидротермических условий на урожай ярового тритикале

Год	Продуктивные влагозапасы почвы в фазу «посев – три листа», мм	Сумма эффективных температур в фазу «конец кущения (начало трубкования) – флаговый лист», °С	Урожай зерна на фоне N ₉₀ P ₈₀ K ₁₂₀ , ц/га
2001	90	253	41,6
2002	127	331	56,3
2003	145	240	41,1
2004	182	289	55,3
2005	183	334	65,4

Анализ, выполненный нами с использованием данных по всем периодам вегетации, показал, что наиболее существенное влияние на продуктивность ярового тритикале в годы исследований оказывали влагозапасы почвы в фазу «посев – три листа» и температуры воздуха в фазу «конец кущения (начало трубкования) – флаговый лист», а для многолетних трав важна была влаготеплообеспеченность в течение всего периода вегетации. В табл. 2 приведены позаимствованные из статьи автора данные влаготеплообеспеченности ярового тритикале в установленные критические периоды [6].

Разработка расчетных зависимостей

Опытные данные по многолетним травам (табл. 1) и яровому тритикале (табл. 2) использованы нами для проверки адекватности функции (1), которая с учетом двух факторов жизни растений – водного и теплового – приведена к виду

$$Y = Y_m K_W K_T \quad (2)$$

где Y_m – максимально возможная в условиях исследований урожайность культуры при заданном пищевом режиме;

K_W, K_T – показатели влаго- и теплообеспеченности культуры.

В соответствии с (1)

$$K_W = 1 - \left(1 - \frac{W - W_{B3}}{W_{HB} - W_{B3}} \right)^2 \quad (3)$$

$$K_T = 1 - \left(1 - \frac{\Sigma T - \Sigma T_{\min}}{\Sigma T_{opt} - \Sigma T_{\min}} \right)^2 \quad (4)$$

где W – влагозапасы почвы; W_{B3} – влагозапасы завядания; W_{HB} – наименьшая влагоемкость; ΣT – сумма среднесуточных температур воздуха; ΣT_{\min} – минимальная сумма среднесуточных температур воздуха, при которой растения могут дать урожай; ΣT_{opt} – оптимальная сумма среднесуточных температур воздуха, обеспечивающих максимальную урожайность.

Упростим зависимость (3), проведя простейшие преобразования

$$K_W = 1 - \left(\frac{W_{HB} - W}{W_{HB} - W_{B3}} \right)^2 \quad (5)$$

Подставив в (5) приведенные выше исходные данные водно-физических свойств мелкозалежного торфа, получим:

$$K_{W(мн.тр.)} = 1 - \left(\frac{180 - W}{120} \right)^2 \quad (6)$$

Для антропогенно-преобразованных почв под яровым тритикале уравнение (5) приводится к виду

$$K_{W(яр.тр.)} = 1 - \left(\frac{220 - W_{np}}{220} \right)^2 \quad (7)$$

где W_{np} – продуктивные влагозапасы в корнеобитаемом слое почвы.

Подобным образом преобразуем зависимость (4):

$$K_T = 1 - \left(\frac{\Sigma T_{opt} - \Sigma T}{\Sigma T_{opt} - \Sigma T_{min}} \right)^2 \quad (8)$$

Для многолетних злаковых трав трехукосного использования продолжительность вегетационных периодов по годам различается несущественно. Поэтому от сумм температуры в (8) можно перейти к среднесуточной температуре воздуха. Поскольку эффективные среднесуточные температуры имеют порог в 10°C, из (8) получим:

$$K_{T(мн.тр.)} = 1 - \left(\frac{T_{opt} - T}{T_{opt} - 10} \right)^2 \quad (9)$$

где T_{opt} – оптимальная среднесуточная температура воздуха, при которой в условиях исследований можно получить максимальную урожайность многолетних трав;

T – средняя за вегетационный период среднесуточная температура воздуха.

Анализ результатов исследований (табл.1) показал, что для многолетних злаковых трав $T_{opt} = 16,5^\circ\text{C}$. Следовательно,

$$K_{T(мн.тр.)} = 1 - \left(\frac{16,5 - T}{6,5} \right)^2 \quad (10)$$

Оперируя возможными комбинациями сумм эффективных температур в опыте с яровым тритикале (табл.2) найдем, что

$$K_{T(\text{яp.тp.})} = 1 - \left(\frac{390 - \Sigma T_{\text{э}}}{260} \right)^2 \quad (11)$$

где $\Sigma T_{\text{э}}$ – сумма эффективных среднесуточных температур воздуха за расчетный период.

Таким образом, адаптируя функцию (1) к конкретным условиям исследований, приходим к расчетным зависимостям

$$Y_{\text{мн.тp.}} = Y_{m(\text{мн.тp.})} \left[1 - \left(\frac{180 - W}{120} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{16,5 - T}{6,5} \right)^2 \right] \quad (12)$$

$$Y_{\text{яp.тp.}} = Y_{m(\text{яp.тp.})} \left[1 - \left(\frac{220 - W_{np}}{220} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{390 - \Sigma T_{\text{э}}}{260} \right)^2 \right] \quad (13)$$

Используя полученные расчетные уравнения (12) и (13), определим численные значения урожайностей исследуемых культур в годы проведения опытов.

Результаты и обсуждение

Анализ опытных данных показал, что в условиях исследований при заданном пицевом режиме $Y_m(\text{мн.тp.}) = 105$ ц/га; $Y_m(\text{яp.тp.}) = 74$ ц/га. Используя установленные значения максимальной урожайности сельскохозяйственных культур, определим расчетные значения фактической урожайности. Расчет проведем в табличной форме (табл. 3, 4).

Таблица 3 – Расчет урожайности многолетних трав по показателям влагообеспеченности вегетационных периодов

Год	Кт	Kw по вариантам опыта			Урожай по вариантам опыта, ц/га						Среднеквадратическое отклонение, вычисленное по отклонениям расчетной урожайности многолетних трав от фактической, составило 4,54 ц/га, что существенно меньше приведенных в табл.1 значений НСР _{0,5} . Заметим, что ни в одном случае разность между расчетной и фактической урожайностью не превысила установленную в годы исследований ошибку опыта. Расчеты также показали, что исключение из расчета показателя теплообеспеченности вегетационного периода увеличивает среднеквадратическую ошибку расчета до 7,53 ц/га. При этом отклонение расчетной урожайности многолетних трав от фактической на варианте с дождеванием в 1978 г. превысило ошибку опыта (НСР _{0,5}).
		К	Д	До	Расчетный			Фактический			
		К	Д	До	К	Д	До	К	Д	До	
1977	0,896	0,949	0,994	-	89,3	93,5	-	86,4	101,7	-	
1978	0,827	0,640	0,894	0,949	55,6	77,6	82,4	59,1	73,3	81,2	
1979	0,985	0,750	0,969	0,977	77,6	100,2	101,	78,7	94,4	99,8	

фактической, составило 4,54 ц/га, что существенно меньше приведенных в табл.1 значений НСР_{0,5}. Заметим, что ни в одном случае разность между расчетной и фактической урожайностью не превысила установленную в годы исследований ошибку опыта. Расчеты также показали, что исключение из расчета показателя теплообеспеченности вегетационного периода увеличивает среднеквадратическую ошибку расчета до 7,53 ц/га. При этом отклонение расчетной урожайности многолетних трав от фактической на варианте с дождеванием в 1978 г. превысило ошибку опыта (НСР_{0,5}).

Таблица 4 – Расчет урожайности ярового тритикале по показателям влаго-теплообеспеченности критических периодов вегетации

Год	K_T	K_W	Урожайность, ц/га		Отклонения, ΔY , ц/га
			Расчетная	Фактическая	
2001	0,722	0,651	34,8	41,6	-6,8
2002	0,949	0,821	57,6	56,3	1,3
2003	0,667	0,884	43,7	41,1	2,6
2004	0,849	0,970	61,0	55,3	5,7
2005	0,954	0,972	68,6	65,4	3,2

В соответствии с данными табл.4 среднее квадратическое отклонение в расчете урожайности ярового тритикале без учета теплообеспеченности составляет около 8 ц/га, а с

учетом – снижается до 4,9 ц/га, т.е. почти вдвое. Более того, анализ показал, что урожайность данной культуры лимитируют именно температурные условия в фазу «конец кущения – флаговый лист», причем еще в большей степени, чем почвенные влагозапасы в любой период вегетации.

Заметим, что приведенные в статье Н.Н.Семенов [6] эмпирические уравнения, связывающие почвенные влагозапасы с урожайностью и имеющие достаточно высокий показатель достоверности предложенной им эмпирической зависимости ($R^2=0,88$), дают среднее квадратическое отклонение расчетной величины урожайности от фактической около 8,7 ц/га. Это существенно больше, чем среднее квадратическое отклонение, полученное при расчете урожайности по зависимости (1). Данный результат убедительно подтверждает преимущество установленной закономерности (1) перед другими эмпирическими зависимостями, которые к тому же имеют значительные ограничения в применении.

Заключение

Анализ результатов полевых исследований разных авторов, изучающих влияние гидротермических условий вегетации на урожайность сельскохозяйственных культур, подтвердил правомерность использования и достаточно высокую точность модели (1), позволяющей учесть не только пищевой режим, но и условия влаго- и теплообеспеченности вегетационных периодов. Удовлетворительная точность обобщающей зависимости (1) при оценке влияния гидротермических условий на урожайность многолетних злаковых трав и ярового тритикале (в области $Y_{расч.} \geq 0,5 Y_m$) свидетельствует о возможности ее применения и для других сельскохозяйственных культур.

Сказанное выше подтверждает исключительную важность водного режима в обеспечении продуктивности торфяной и любой другой почвы. Данный фактор незаменим и равноценен пищевому, тепловому и другим основным факторам жизни растений, аналогичным образом воздействует на формирование урожая. Используя закономерность (1), можно устанавливать лимитирующий фактор, определять ущербы, наносимые засухой, или прибавки урожайности от улучшения водного режима при мелиорации.

Выполненный анализ однозначно указывает на важность управления водным режимом торфяных и постторфяных почв с целью создания благоприятных условий для сохранения и повышения их продуктивности, формирования высоких и устойчивых урожаев возделываемых сельскохозяйственных культур.

Литература

1. Механизация полива: справочник / Б.Г. Штепа, В.Ф. Носенко, Н.В. Винникова и др. – М.: Агропромиздат, 1990. – 31-37 с.
2. Лихацевич, А.П. Модель влияния регулируемых факторов окружающей среды на урожай сельскохозяйственных культур / А.П.Лихацевич // Мелиорация переувлажненных земель. – 2004. – № 2(52). – С. 123-143.
3. Лихацевич, А.П. Приближенная количественная оценка воздействия факторов окружающей среды на формирование урожая сельскохозяйственных культур / А.П.Лихацевич // Мелиорация переувлажненных земель. – 2006. – № 1(55). – С. 95-102.
4. Лихацевич, А.П. Исследование режима дождевания и мелкодисперсного увлажнения многолетних трав на торфяных почвах: дисс. ... канд. техн. Наук : 06.01.02 / А.П. Лихацевич. – Мн. : БелНИИМивХ, 1982. – 196 с.
5. Амнуил, Х.И. О методике определения нижнего предела полезной для растений влаги в торфяных почвах / Х.И. Амнуил // Тр. БелНИИМивХ, 1956. – С 275-287.
6. Семененко, Н.Н. Оптимизация продукционного процесса – важнейшее условие формирования стабильной высокой урожайности зерновых культур / Н.Н. Семененко // Земляробства і ахова раслін. – 2009. – № 4. – С. 5-10.

Summary

Likhatceвич A.P., Volkova E.I.

EVALUATION OF WATER AND WARMTH PROVISION ON CROP YIELDS (FOR EXAMPLE PERENNIAL HERBS AND SPRING TRITICALE)

Analysis of the results of field studies by various authors about the effect of hydrothermal vegetation conditions on crop yields confirmed the legitimacy of usage and sufficiently high accuracy of the model in which productivity depends on the amplitude deviation of influencing factor from its optimal value. The proposed dependence can account for the effect on yield as a food regime and the conditions of moisture and heat supply of growing seasons.

Поступила 8 сентября 2011 г.