

УДК 551.521+551.579.1+631.165 (470.32+470.40/.43)

Л.Л. Тарасова¹, И.А. Шульгин²

ГИДРО- И РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ УРОЖАЙНОСТЬ РАННИХ ЯРОВЫХ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧЕРНОЗЕМНОЙ ОБЛАСТИ И СРЕДНЕМ ПОВОЛЖЬЕ

На основе данных агрометеорологических и актинометрических станций сети Росгидромета с 1996 по 2008 г., а также данных Росстата о средней областной урожайности яровых культур (ячменя и пшеницы) по всем категориям хозяйств построена энергобалансовая статистическая модель их потенциальной урожайности. Впервые показано, что в условиях центральных черноземных областей яровые культуры при высокой агротехнике могут ежегодно давать до 50 ц/га, тогда как в Среднем Поволжье высокие урожаи лимитируются малым количеством осадков и возможны лишь в отдельные годы.

Ключевые слова: энергетический баланс растений, КПД фотосинтеза, урожайность, ранние яровые зерновые культуры.

Введение. Наиболее важной стратегической задачей XXI в., несомненно, является ускоренный рост производства сельскохозяйственной продукции. Обеспеченность населения продуктами питания всегда была не только главным условием существования, но и решающим фактором социальной стабильности отдельных стран и мирового сообщества в целом [2].

Более половины посевных площадей нашей страны приходится на зерновые культуры. Под влиянием конъюнктуры рынка в составе зерновых увеличились посевные площади под продовольственными зерновыми культурами, и в первую очередь под яровой пшеницей.

Возникает вопрос: какова может быть максимальная урожайность ранних яровых зерновых культур в том или ином регионе России? Для ответа на этот вопрос нами была создана статистическая модель урожайности этих культур для черноземных областей европейской части России. Черноземье выбрано, с одной стороны, как один из самых благоприятных регионов для сельскохозяйственного производства, а с другой — как район с хорошо развитой сетью агрометеорологических и актинометрических станций.

Исходная информация. В качестве исходной информации мы взяли данные агрометеорологических и актинометрических станций сети Росгидромета с 1996 по 2008 г., любезно предоставленные Главной геофизической обсерваторией имени А.И. Воейкова и отделом агрометеорологических прогнозов ГУ «Гидрометцентр России», а также данные Росстата о средней областной урожайности яровых культур (ячменя и пшеницы) по всем категориям хозяйств за каждый год. На основе полученных материалов нами создана база данных, содержащая информацию о датах наступления основных фенологических фаз этих культур, о приходе фотосинтетически активной солнечной радиации (ФоАР), о количестве осад-

ков и запасах продуктивной влаги (ЗПВ) в почве. Период с 1996 г. по настоящее время выбран нами прежде всего из климатических соображений, так как известно, что в начале 90-х гг. прошлого века в трендах температуры, дат перехода температуры к положительным значениям и дат схода устойчивого снежного покрова наблюдается резкий рост; кроме того, для этого периода сформированы базы данных на современных электронных носителях.

Статистическая модель потенциальной урожайности. Рассмотрим идеальную картину: будем считать, что состояние растений хорошее и отличное, посевы зеленые, с оптимальным числом стеблей и листьев на единицу площади, не угнетенные сорняками и не испытывающие недостатка во влаге. В то же время мы используем реальные значения радиационных потоков, сумм осадков, запасов продуктивной влаги после стаивания снежного покрова, а также фактические периоды роста ранних яровых зерновых культур по данным агрометеостанций.

Основой нашей модели потенциальной урожайности стало уравнение энергетического баланса растений. В условиях равновесия, когда расход энергии на основные физиологические процессы равен ее приходу на посев и поглощению растениями, энергетический баланс можно упрощенно представить как равенство между поглощенной листьями лучистой энергией QA (Q — интенсивность ФоАР, A — коэффициент поглощения ФоАР листьями) и энергией, идущей на фотосинтез (газообмен) Q_p и запасаемый в приросте биомассы (Q_m), а также на транспирацию Q_T и теплообмен Q_r :

$$QA = Q_{p,m} + Q_T + Q_r$$

В условиях, когда влага не лимитирует рост растений, температурный градиент между листьями и воздухом близок к нулю, поэтому значением Q_r можно

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, мл. науч. с. e-mail: lydia_tarasova@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, профессор, докт. биол. н., e-mail: ufarin@yandex.ru

Таблица 1

Даты наступления фаз развития ярового ячменя в 1996–2008 гг.

Станция	Фазы развития	Всходы	Выход в трубку	Колошение	Молочная спелость	Восковая спелость
Курск	средняя	02.V	28.V	23.VI	08.VII	22.VII
	ранняя	16.IV	24.V	14.VI	24.VI	06.VII
	поздняя	16.V	06.VI	02.VII	20.VII	30.VII
Мичуринск	средняя	08.V	02.VI	22.VI	12.VII	23.VII
	ранняя	24.IV	28.V	14.VI	04.VII	14.VII
	поздняя	20.V	14.VI	30.VI	20.VII	06.VIII
Каменная Степь	средняя	07.V	27.VI	20.VI	05.VII	19.VII
	ранняя	22.IV	12.V	12.VI	28.VI	10.VII
	поздняя	20.V	06.VI	26.VI	10.VII	28.VII
Самара	средняя	10.V	01.VI	20.VI	05.VII	17.VII
	ранняя	28.IV	22.V	12.VI	26.VI	06.VII
	поздняя	26.V	30.V	28.VI	14.VII	30.VII
Ершов	средняя	10.V	28.V	18.VI	01.VII	15.VII
	ранняя	30.IV	18.V	12.VI	26.VI	04.VII
	поздняя	20.V	06.VI	24.VI	10.VII	20.VII

пренебречь. По существу, состояние энергетического баланса при равенстве приходной и расходной его частей — одна из важнейших оптимизационных функций листьев и организма в целом, направленная на максимально эффективную работу листа в текущий момент, а тем более за сутки — основную единицу биологического времени [6].

Поглощенную ФоАР мы рассчитывали, исходя из предположения, что хорошо развитые сомкнутые зеленые посевы за период от появления всходов до цветения имеют альбедо не более 10% и пропускают к почве не более 10% приходящей солнечной радиации, т.е. около 80% поглощается листьями [5]. Интенсивный рост яровых ячменя и пшеницы и, следовательно, их активная фотосинтетическая деятельность продолжают в основном до колошения — цветения (рис. 1, табл. 1).

За период роста (от появления всходов до начала цветения) нами рассчитаны суммы ФоАР по 5 станциям: Курск, Мичуринск (Тамбовская область), Каменная Степь (Воронежская область), Самара,

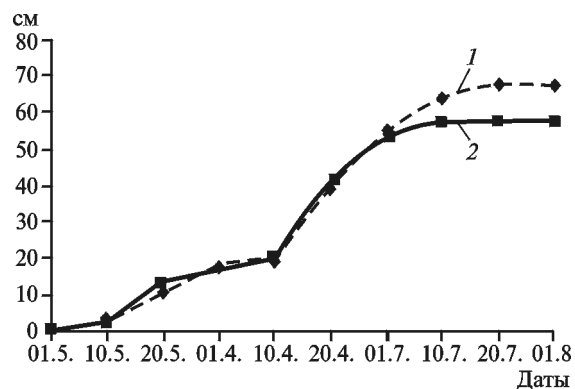


Рис. 1. Средняя за период 1996–2008 гг. высота ярового ячменя: 1 — Курск, 2 — Ершов (Саратовская область)

Ершов (Саратовская область). Период роста не был постоянен. В зависимости от фона температуры воздуха он колебался от 6–8 декад в западных областях черноземной зоны до 4–5 декад в восточных. В среднем за период 1996–2008 гг. всходы ярового ячменя появляются в первой декаде мая (табл. 1). Самые ранние даты появления всходов — вторая-третья декады апреля — отмечены в 2008 г., когда отклонение температуры от средних многолетних значений в марте и апреле составило 5–7 °С. Наиболее поздние всходы наблюдались в третьей декаде мая в 1998 и 2003 гг. Колошение обычно начинается в третьей декаде июня, тогда как в аномальные годы наблюдается смещение сроков примерно на 7–10 дней. Суммы поглощенной ФоАР за этот период составляют, как правило, 400–600 МДж/м² (табл. 2).

Подчеркнем, что, в отличие от общепринятого подхода, при котором в расчетах ФоАР используется сумма приходящей ФоАР от всходов до уборки урожая, когда, по существу, уже в фазу молочной спелости фотосинтез практически прекращается, мы рассматриваем *продуктивные ресурсы ФоАР*, т.е. за период активной фотосинтетической деятельности. Поэтому приводимые нами значения меньше обычно рассматриваемых на 20–25%, что влияет и на последующие расчеты урожая.

Таблица 2

Компоненты энергетического баланса и потенциальная урожайность ранних яровых зерновых культур

Показатели	Курск	Мичуринск	Каменная Степь	Самара	Ершов
Приходящая ФоАР (Q), МДж/м ²	644	592	596	656	597
Поглощаемая ФоАР (QA), МДж/м ²	515	473	477	525	478
Используемая ФоАР в фотосинтезе и запасаемая в биомассе ($Q_p = Q_m$), МДж/м ²	26	24	24	26	24
Энергия на возможную транспирацию Q_T , МДж/м ²	489	450	418	499	454
Возможная транспирация, T , мм	219	201	203	223	203
Потенциальная масса зерна, ц/га	51	47	47	52	48
Средняя областная урожайность, ц/га	21	17	19	13	11
Сумма количества осадков	101	118	81	61	51
Запасы продуктивной влаги в 0–100 см в фазы всходы/колошение, мм	212/155	197/152	213/138	125/74	116/58

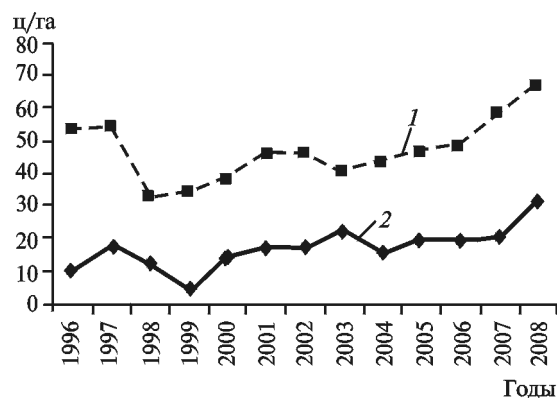


Рис. 2. Средняя областная и потенциальная урожайность ранних яровых зерновых культур, Мичуринск (Тамбовская область): 1 — потенциальная урожайность, 2 — средняя областная урожайность

Зетем, исходя из литературных данных, мы предположили, что на фотосинтез и создание конечной биомассы расходуется как максимум 5% от поглощенной ФоАР. Такой КПД отвечает хорошо ухоженным, не испытывающим недостатка в питательных веществах посевам. Эта величина близка к теоретическим значениям максимально возможного КПД поглощенной ФоАР (6–7%), рассчитанного для высокопродуктивных посевов и реализуемого в экспериментах при оптимальных условиях среды [1, 3, 4]. Из этой предпосылки и на основе соотношения Q_m/Q_A можно рассчитать общую массу растений и, считая, что масса зерновок колоса составляет не более 1/3 от массы растения, можно получить величину потенциальной, т.е. возможной, массы зерна.

По нашей модели расчетная потенциально возможная урожайность зерна составляет 45–50 ц/га, что в 2–4 раза превышает реальную среднюю областную урожайность (рис. 2, табл. 2). В зависимости от погодных условий в период роста урожайность может достигать 60 ц/га. Корреляция между потенциальной урожайностью и фактической весьма высока (0,4–0,7). Из этого можно сделать вывод, что именно приход солнечной радиации — основного фактора, который растения «делают» лимитирующим, — определяет конечную урожайность ранних яровых зерновых культур, хотя и другие факторы, в первую очередь агротехнические мероприятия и плодородие почв, имеют большое значение.

Зададим второй вопрос: благоприятны ли другие важные условия черноземной зоны для получения столь высоких урожаев?

Агрометеорологическая обеспеченность высоких урожаев в Центральном Черноземье и Среднем Поволжье. Здесь в первую очередь нужно рассмотреть режим осадков и влажности почв. Для этого нами рассчитана возможная транспирация Q_T посевов за тот же период роста и активной фотосинтетической деятельности.

Для расчета Q_T существуют два подхода. Один из них физический, согласно которому $Q_T = K_T T$, где

K_T — теплота парообразования, которая для воды при температуре 20–25 °С составляет около 580–585 кал/г, T — интенсивность транспирации. При таком подходе поглощенная листьями лучистая энергия, не идущая на фотосинтез (т.е. около 95%), превращается в тепловую и далее распространяется по клеткам к их наружным стенкам, где и происходит фазовый переход приходящей жидкой воды в парообразную. В этом случае допускается, что снижение фотосинтеза, согласно балансу, может увеличить долю энергии, идущей на транспирацию.

Второй подход физиологический, согласно которому поглощенная ФоАР не переходит в тепловую, а направляется, не нагревая ткани, к многочисленным аквапоринам клеток, где и расходуется на парообразование в межклеточном пространстве [5, 6]. В этом случае транспирация пропорциональна фотосинтезу, а снижение активности одного из этих процессов влияет на уменьшение активности другого, что соответствует экспериментальным данным. В обоих подходах величины теплоты парообразования и энергии на транспирацию практически одинаковы и отличаются не более чем на 4%.

Итак, зная теплоту парообразования и плотность воды, а также величину расхода энергии на Q_T , можно перейти к значениям транспирации T , а от них — к миллиметрам водного слоя, что удобнее для сопоставления с количеством осадков и запасами продуктивной влаги в почве.

За период от всходов до колошения транспирация листьями яровых ячменя и пшеницы составила, по нашим расчетам, в среднем около 200–220 мм (табл. 2). Однако на полях растения могут использовать лишь только ту влагу, которая имеется в почве. Будем считать, что все осадки просачиваются в почву, и физическое испарение с ее поверхности равно нулю. Иначе говоря, на транспирацию растение может потратить как весенние запасы влаги, образовавшиеся за счет таяния снежного покрова, так и выпадающие осадки. По данным сети станций Росгидромета, в 1996–2008 гг. сумма количества осадков за период от всходов до колошения и весенних запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы варьировала от 170–180 мм в Среднем Поволжье (меньше требуемых для высоких урожаев) до 300–315 мм в Центрально-Черноземной области (даже больше требуемых). За весь период с 1996 по 2008 г. в Самарской и Саратовской областях почти во все годы влаги в почве было недостаточно, и всего лишь в течение 3–4 лет возможная и необходимая транспирация не превышала имеющуюся влагу. Если в Воронежской и Тамбовской областях отмечено лишь 2–3 сухих года, то в Курской области таких лет не было. Из этого следует, что на западе черноземной зоны Российской Федерации можно получать высокие урожаи, и это не лимитируется наличием влаги в почве, в то время как на востоке этой зоны они возможны лишь в отдельные годы.

Из сказанного следует также, что достаточно низкий уровень получаемых урожаев связан не с лимитированием Φ_oAP и запасов продуктивной влаги, а, по-видимому, с невысоким уровнем агротехники и корневого питания растений. Разумеется, наряду с возможным негативным влиянием указанных факторов свою роль могут играть не рассматриваемая в статье неравномерность, аperiodичность прихода и действия иных факторов (суточные суммы Φ_oAP , осадки, дневная температура воздуха, интенсивность поглощения минеральных веществ из почвы и т.д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ничипорович А.А. Фотосинтетическая деятельность растений как основа их продуктивности в биосфере и земледелии // Фотосинтез и продукционный процесс. М.: Наука, 1988. С. 5–28.
2. Общество и экономика / Под ред. К.М. Микульского. М.: Наука, 2001. 223 с.
3. Тооминг Х.Г. Солнечная радиация и формирование урожая. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 200 с.

Заключение. Использованный методический подход к оценке продуктивности ранних яровых зерновых культур на основе гидро- и радиационного режима Центрально-Черноземной области и Среднего Поволжья позволяет обосновать уровень зерновой продуктивности этого региона.

Впервые показано, что в условиях Центрально-Черноземной области ранние яровые зерновые культуры при высокой агротехнике могут ежегодно давать до 50 ц/га, тогда как в Среднем Поволжье высокие урожаи лимитируются малым количеством осадков и возможны лишь в отдельные годы.

4. Тооминг Х.Г. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 264 с.

5. Шулгин И.А. Радиационные и физиологические параметры продуктивности агрофитоценозов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 57 с.

6. Шулгин И.А. Лучистая энергия и энергетический баланс растений. М.: Альтекс, 2004. 141 с.

Поступила в редакцию
09.07.2009

L.L. Tarasova, I.A. Shulgin

HYDRO-RADIATION REGIME AND POTENTIAL YIELDS OF EARLY SPRING CROPS IN THE CENTRAL-CHERNOZEM OBLAST AND THE MIDDLE VOLGA RIVER REGION

The energy-balance statistical model of potential yields of spring barley and wheat was developed using the 1996–2008 data of agro-meteorological and actinometrical stations of the Roshydromet network and the Rosstat data on the average yields of these crops for all types of farms in particular oblasts. For the first time it was shown that under advanced agrotechnologies spring crops could yield up to 5 t/ha each year, while in the Middle Volga River region the yields are limited by low precipitation and could reach high values only in particular years.

Key words: energy balance of plants, efficiency of photosynthesis, yields of early spring grain crops.