

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС И ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПРОДУКТИВНОСТИ ПОСЕВОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

И.А. Шульгин

Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, ufarin@yandex.ru

Реферат. Представлены основные компоненты приходной и расходной части энергетического баланса (ЭБ) растений, обуславливающие продуктивность. Их значения позволяют оценивать максимально возможные продуктивность (МВП) и урожайность (МВУ) посевов яровых сельскохозяйственных культур в оптимальных условиях.

На основе физиологических подходов к описанию продукционного процесса у растений и результатов актинометрических и агрометеорологических наблюдений рассмотрены модели ЭБ посевов яровой пшеницы и ячменя в Центральных черноземных областях (ЦЧО) РФ. С их помощью рассчитана средняя за 1996-2010 гг. МВУ: 50 – 55 ц/га с диапазоном варьирования 25 – 70 ц/га за счет разного прихода фотосинтетически активной радиации (ФАР) в течение вегетации в разные годы.

Показано, что для обеспечения таких средних значений МВУ необходимо (согласно ЭБ) иметь около 210 – 230 мм доступной влаги, расходуемой за период роста растений. Реальные запасы продуктивной влаги (ЗПВ) в слое 0-100 см почвы не превышают 150 – 170 мм. Они способны, в соответствии с функциональными соотношениями компонентов ЭБ, обеспечить среднегодовую урожайность лишь в 35 – 37 ц/га.

Отсутствие тренда приходящей суммарной солнечной радиации в период вегетации яровых культур в ЦЧО в течение второй половины XX века позволяет полагать, что и в ближайшие десятилетия среднегодовые МВП и МВУ сохранятся на прежнем уровне, хотя потенциально урожайность могла бы увеличиться за счет возрастания ЗПВ.

Ключевые слова. Солнечная радиация, энергетический баланс, яровые злаки, посевы, фотосинтез, транспирация, потенциальная продуктивность, урожай.

ENERGY BUDGET AND PHYSIOLOGICAL CRITERIA FOR CROPS' PRODUCTIVITY UNDER CLIMATE CHANGE

I.A. Shulgin

Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leniskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation, ufarin@yendex.ru

Abstract. The main physiological input and output components of plant energy budget (EB) controlling its productivity are presented. The values allow to estimate maximum possible productivity (MPP) and yield (MPY) of spring crops under optimum conditions.

On the basis of physiological approach to the description of the plant productivity and results of actinometric and agrometeorological observations, a model for EB of spring wheat and barley crops is developed for the central chernozem region (CCR) of the Russian Federation. Average MPY of 50 – 55 centner/ha for 1996-2010 was calculated with the model. It ranges from 25 to 70 centner/ha due to varying income flux of photosynthetic active radiation over vegetation season in different years.

It is shown that (according to EB) such average MPY require about 210 – 230 mm of available moisture to be used during the plant growing season. Actual productive moisture content in 0 – 100 cm soil layer does not exceed 150 – 170 mm. According to physiological functional ratios of PB components, this can ensure average long-term yield just of 35 – 37 centner/ha.

Absence of a trend in the total income flux of solar radiation over vegetation period of spring crops in CCR in the second half of the 20th century allows to hypothesize that long-term average MPP and MPY will remain unchanged, although potentially productivity may increase under enhanced productive moisture content.

Key words. Solar radiation, energy balance, spring cereals, crops, photosynthesis, transpiration, potential productivity, yield.

Введение

Одной из актуальных проблем стоящих перед фитометеорологией и, в частности, с.-х. метеорологией, является решение задачи выявления «потолка» и возможностей получения максимально возможной продуктивности (МВП, т.е. общей биомассы) и урожайности (МВУ, т.е. хозяйственно ценных органов)

возделываемых культур в наиболее благоприятных условиях роста применительно к погоднo-климатическим режимам физико-географических регионов.

Актуальность этой проблемы связана и с проблемами продовольственной безопасности России, для решения которых необходимо, в частности, знание потенциальных ресурсов растениеводства и возможности их реализации в условиях изменения климата.

Как известно, процесс формирования и величина биологической продукции растений – в посевах и насаждениях – обусловлены фотосинтетической деятельностью (ФД), совершаемой за счет поглощаемой лучистой энергии Солнца (Ничипорович, 1956, 1963; Ничипорович, Шульгин, 1976; Тооминг, 1977; Шульгин, 1973, 2004).

Продукционный процесс посевов изучается достаточно давно – к нему привлечено внимание специалистов различных областей науки и практики – физиологии растений и экологии, физики, метеорологии и климатологии, почвоведения, математики и других. Результаты исследований и общее состояние проблемы представлены в монографиях, сборниках трудов, статьях, учебниках и учебных пособиях (Алехина и др., 2005; Гордеев и др., 2006; Грингоф, Клещенко, 2011; Кошкин, 2010; Кузнецов, Дмитриева, 2006; Росс, 1975; Шульгин, 1973, 2002, 2004, 2009) и учитываются в математических моделях системы «погода-урожай-математика» (Сиротенко, 1981).

При решении отмеченных задач из многих факторов продуктивности основное внимание уделялось гидротермическому режиму почвы и воздуха и меньше – солнечной радиации. Об этом говорит и то, что в настоящее время в Центрально-Черноземных областях лишь на 3 из 30 метеостанций, ведущих агрометеорологические наблюдения, измеряются суммы приходящей суммарной солнечной радиации (Q).

Одной из причин такого положения является убежденность многих агрометеорологов в том, что солнечная радиация – фактор, не поддающийся регуляции, достаточный для растений.

Между тем, еще К.А.Тимирязевым, разработавшим принципиальные подходы к оценке потенциальной продуктивности растений и опиравшимся на законы сохранения энергии Р.Майера и Г.Гельмгольца, неоднократно подчеркивалось, что только на основе изучения энергетики физиологических процессов можно получить

представление о максимальной производительности растительности, включая посевы.

Он прозорливо и точно, словно к сегодняшнему дню, писал, что *«Мы можем доставить растению сколько угодно удобрений, сколько угодно воды, можем, пожалуй оберегать его от холода в теплицах, можем ускорить круговорот углекислоты, но не получим органического вещества более того количества, которое соответствует количеству солнечной энергии, получаемой растением от солнца. Это – предел, преступить за который не во власти человека. Но раз мы узнаем этот предел, мы получим настоящую, строго научную меру для предела производительности данной площади земли, а, в то же время, будем в состоянии судить о том, насколько наши культуры приближаются к совершенству...»* (Тимирязев, 1948).

Из фундаментальной значимости мнения К.А. Тимирязева для последующего развития физиологии растений и начались исследования энергетического баланса (ЭБ) листа, растения и посева в целом, позволяющего составить общее представление о МВП и реальной, действительно возможной (ДВП) в данных условиях, продуктивности.

Энергетический баланс растений и посевов

Основные результаты исследований ЭБ принципиального характера представлены в ряде работ (Клешнин и др., 1955; Шульгин и др. 1960; Шульгин, Щербина, 1981, 1988, 1990; Шульгин, 2004; Шульгин, Тарасова, 2009).

В этих исследованиях использовались методики, позволившие экспериментально изучать основные компоненты ЭБ – приход солнечной радиации (Q , 0,29-4,0 мкм), ее поглощение листьями и посевами в отдельных участках спектра. Наряду с этим изучались и другие компоненты ЭБ – газообмен, транспирация, теплообмен и т.д.

Как известно, все физиологические процессы в растениях совершаются за счет солнечной радиации, поглощаемой в области 380-750 нм и называемой физиологически активной радиацией (ФАР).

Энергия этого диапазона регулирует многочисленные регуляторно-информационные процессы (гелиотропизм, фототропизм, фотопериодизм, фотоморфогенез и др). Особенно

важна радиация в области 380-450, 650-670 и 730-750 нм (Алехина и др., 2005).

В пределах ФАР, в более узкой ее области (380-710 нм), протекают высокоэнергетические светозависимые (f) процессы – истинный фотосинтез P', фотосинтез P_f, фотодыхание R_f, фототранспирация T_f, а так же теплообмен между листом и воздухом t_f (Шульгин, 2004) хотя эту область по прежнему называют «фотосинтетически» активной радиацией (ФАР, Q_f).

Сам ЭБ растения или посева с.-х. культур за сутки (основную единицу биологического времени) может быть представлен для области ФАР в упрощенном виде следующим образом (Шульгин, 2004):

$$[Q \cdot k_f \cdot A_f = Q_{Af}] = [Q_{Af} \cdot \Pi_{Af} \cdot \bullet = Q_p = (Q_p - Q_R) = Q_M] + Q_T + Q_t + Q_{ir}.$$

Здесь Q – приход суммарной интегральной солнечной радиации; k_f – коэффициент перехода от Q к суммарной радиации в области ФАР (Q_f); A_f – коэффициент поглощения ФАР растением или посевом; Q_{Af} – поглощенная ФАР. В расходной части баланса Q_p – доля поглощенной ФАР, идущей на фотосинтез (газообмен, P) в соответствии с коэффициентом эффективности ее использования (ЭИ ФАР) или, что то же, с коэффициентом ее полезного действия (КПДА, Π_{Af}). Одновременно Q_p характеризует использование Q_{Af} на ее запасание (Q_M) в сухой биомассе M.

Фотосинтез P (газообмен) и необходимая для него энергия Q_p – разность между Q_p, используемой на *истинный фотосинтез P'* (поглощение CO₂ и H₂O, образование продуктов) и расходом энергии Q_R на *суммарное дыхание R* за сутки, состоящего из компонента Q_{Rf} (*фотодыхания R_f* автотрофных тканей на свету) и компонента Q_{Rd} (*«темнового»*, т.е. светонезависимого дыхания этих же тканей в темноте и всех гетеротрофных тканей и органов как на свету, так и в темноте).

Q_T – энергия, расходуемая на *транспирацию T*, осуществляемую в листьях (в сопряженных с истинным фотосинтезом процессах) в виде *фототранспирации T_f* (Шульгин, Мурей, 1978) и «темновой» (т.е. светонезависимой) *термотранспирации T_d*, идущей во всех гетеротрофных органах на свету и в темноте за счет выделяемой тепловой энергии при их «темновом» дыхании, а так же за счет притока тепла из воздуха.

Для T_f и T_d , независимо от механизма превращения в этих процессах жидкой воды на внешней стороне клеток в парообразную, затрачивается около 580 кал/г (2420 Дж/г) при 20-25°C. По существу $Q_T = K_T \cdot T$, где K_T – энергия (теплота) парообразования, а T – транспирация.

Для растений и посева в период активной фотосинтетической деятельности (ФД) за сутки T почти равна влагопотреблению. За весь период вегетации в величину T входит около 10-12% влаги в конечной воздушно-сухой биомассе, а 88-90% поглощаемой влаги представлены подвижной, «свободной» влагой, быстро транспирируемой, и временно «запасаемой» в структурах органов в виде «рыхло-» и «прочносвязанной» воды, медленно проходящей через них и также в итоге испаряемой (Гусев, 1967)

При дефиците подаваемой из корней влаги, часть поглощенной энергии, не используемой на P и T_f , расходуется на нагрев тканей листьев (Q_t) на свету (Q_{if}) и градиент температуры между листом и воздухом может быть больше нуля. Если же нет дефицита влаги в зоне корней (например, при выращивании риса на «затопляемых» или хлопчатника на орошаемых полях), то температура листьев за счет T может быть на несколько градусов ниже температуры воздуха.

Забегая вперед, отметим, что распределение Q_{Af} в расходной части ЭБ при оптимальных условиях роста растений примерно таково: за сутки на Q_P идет около 16%, на Q_R – около 6%, так что на Q_P приходится и запасается в биомассе около 10% (Шульгин, 2004). Отношение же Q_M к Q_{Af} – величина КПД_A (Π_{Af}), достигающая 8-12%.

Значение 10%-го КПД ФАР по газообмену и приросту M является теоретически и фактически максимально возможным для целого растения за сутки вне посева и в посеве, независящим от его возраста (до репродуктивной фазы) и видовой принадлежности растений к С-3 или С-4 типам (Шульгин, Мурей, 1978). В посеве Π_{Af} по M может достигать в период S_{max} 12,5%. На Q_T расходуется в оптимальных условиях до 88-90% от Q_{Af} , тогда как Q_t близка к нулю.

Наконец, часть (1-2%) Q_{Af} расходуется на регуляторно-информационные процессы Q_{it} , первая фаза которых протекает за счет лучистой энергии. Способность использовать крайне низкие интенсивности Q_f адаптивно связана с тем, что в природе растения сталкиваются с «полутемнотой» (в сумерки) перед ночью и после нее, когда ФД фактически прекращается, но есть необходимость

настраивать «биологические часы» и ритмику процессов (Алехина и др., 2005; Шульгин, 2004).

Из уравнения ЭБ (основной модели ЭБ) следует, что для получения информации о МВП и МВУ растений и посевов за тот или иной интервал, их активной ФД, необходимо знать, во-первых, численные значения компонентов приходной части ЭБ и, во-вторых, величину ЭИ ФАР (Π_{Af}), позволяющую рассчитать количество энергии, запасенной в Q_M и саму биомассу М.

Разработке экспериментальных основ ЭБ содействовало то, что в это же время (1950-1970 гг.) в Институте физиологии растений им. К.А. Тимирязева АН СССР под эгидой Научного Совета по фотосинтезу интенсивно разрабатывалась академиком А.А.Ничипоровичем и его коллегами теория ФД растений и посевов (Ничипорович, 1963), согласно которой продуктивность – результат многих сопряженных процессов, включая и фотосинтез. Внимание было направлено, во-первых, на оценку прихода ФАР к посевам, на роль структурной организации посевов, влияющей на радиационный режим в посевах (Росс, 1975; Росс, Тооминг, 1968; Нийлиск, Росс, 1969 и др.). Внимание уделялось, во-вторых, на выявление максимально возможного КПД ФАР на образование общей биомассы (МВП) и урожая (МВУ). Это делалось путем оценок реальных и формирования максимально продуктивных посевов, выращиваемых в разных зонах СССР при не лимитируемом водно-корневом питании, чтобы соотнести энергию в конечной биомассе с приходящей к посеву ФАР и расчету величины КПД.

Были выявлены максимальные значения КПД приходящей ФАР для образования М посевов (4-6%, Ничипорович, 1963), которые и по ныне приводятся в ряде работ (Грингоф, Клещенко, 2011; Кошкин, 2010). Работами в фитотронах с высшими растениями и одноклеточными зелеными водорослями было показано, что Π_{Af} по Р и М за сутки может достигать 10-12%. Таким образом, оба направления исследований – изучение ФД и ЭБ, проводившихся в естественных условиях и в фитотронах, позволило детальнее рассмотреть продукционный процесс.

Задачи работы и полученные результаты

В работе рассмотрены две основные задачи:

- во-первых, оценить среднемноголетнюю потенциальную продуктивность (МВП) и хозяйственную урожайность (МВУ)

посевов ранних яровых культур (пшеницы и ячменя) в наиболее благоприятном климатическом регионе для сельскохозяйственного производства России, какими являются ЦЧО, имеющие развитую сеть метеорологических станций;

- во-вторых, оценить возможный диапазон МВП и МВУ этих культур в ЦЧО в зависимости от прихода Q в те или иные годы.

Определим понятие «максимально возможная продуктивность» (МВП). Под ним понимается та величина конечной общей абсолютно сухой биомассы, которую обуславливают только три фактора – приход радиации, ее поглощение посевом и эффективность использования на создание биомассы M .

Принимается, что состояние посевов при оценке МВП в целом «идеальное»: оно обусловлено оптимальной нормой высева семян, количеством растений на единице площади земли, площадью листьев с характерной для них ориентацией и распределением по высоте. Такой посев имеет оптимальные для вида (сорта) листовую индекс (LAI , m^2/m^2), оптико-физиологическую плотность (Ничипорович, Шульгин, 1976; Росс, 1975; Тооминг, 1977; Шульгин и др, 1975), что позволяет посеву работать наиболее эффективно при разных интенсивностях ФАР в течение дня. Принимается, что посевы не испытывают недостатка (или избытка) ни во влаге, ни в минеральном питании и т.д.

При рассмотрении этих двух задач можно оценить, наряду с радиационными компонентами ЭБ и величинами МВП, не менее важный компонент – расход Q_{Af} на взаимосвязанные процессы влагопотребления и транспирации (Q_T). Это позволяет выявить соотношение между реальными запасами продуктивной влаги (ЗПВ) в почве с той влагой, которая минимально необходима посеву для его максимальной продуктивности.

Конкретная задача заключалась в том, чтобы в уравнение ЭБ, причем упрощенное, ввести фактическую информацию² для его

² Данные актинометрических наблюдений за период 1996-2010 гг. по просьбе автора предоставлены ФГБУ «ГГО» из режимно-справочного банка данных «Актинометрия». Результаты агрометеорологических наблюдений предоставлены ФГБУ «Гидрометцентр РФ» из банка данных «Отдела агрометеорологических прогнозов» и их обработка выполнена Л.Л. Тарасовой.

компонентов и произвести необходимые расчеты (Тарасова, Шульгин, 2010; Шульгин, Тарасова, 2009).

Прежде всего, рассматривали сроки вегетации пшеницы и ячменя, продолжительность фаз, периода фотосинтетической деятельности (ФД, «всходы-молочная спелость») (табл. 1). За период ФД рассчитаны суммы Q за каждый год и годы наблюдений, и при $K_f = 0,48$ получены среднемноголетние суммы Q_f (табл. 2).

Таблица 1.

Продолжительность периодов роста ранней яровой пшеницы и ячменя и приход суммарной солнечной радиации за период их активной фотосинтетической деятельности

Область	Станция	Продолжительность периодов, дни			Суммы суммарной солнечной радиации (Q), МДж/м ²
		Всходы – выход в трубку	Всходы – молочная спелость	Всходы – восковая спелость	
Курская	Петринка	25 16...39	64 53...75	77 59...85	1336 1066...1602
Тамбовская	Мичуринск	27 16...41	65 50...77	76 72...83	1278 877...1755
Воронежская	Каменная Степь	22 16...30	58 49...67	72 61...85	1223 891...1520

В верхней строке – средняя за период; в нижней – наименьшая ... наибольшая величина.

Принято, что коэффициент A_f за периоды ФД посевов равен в среднем 80% (Тооминг, 1977). Отсюда получены значения Q_{Af} (табл. 2). Значение Π_{Af} посевом за период ФД принято равным 5% (Шульгин и др., 2011), что не является, как известно, максимальной величиной, достигающей в наиболее оптимальных условиях роста 6-8% (Шульгин, 2004).

Отсюда получаем величину $Q_M = Q_{Af} \cdot \Pi_{Af}$, а из Q_M – значения конечной общей биомассы посева $M = Q_M/q$, где q – средняя энергоёмкость 1г М, равная 4 ккал/г (16,8 кДж/г).

Таким образом, получено среднее значение радиационно обусловленной «климатической» МВП посевов, равное 153-155 ц/га. Аналогичная величина для земледельческой зоны России,

выраженная в радиационно-термическом (биоклиматическом) потенциале, составляет в среднем около 135 ц/га надземной сухой биомассы (Гордеев и др., 2006) или около 150-160 ц/га общей биомассы.

Таблица 2.

Компоненты энергетического баланса и максимально возможная урожайность ранней яровой пшеницы и ячменя

Компоненты баланса	Область, станция		
	Курская, Петринка	Тамбовская, Мичуринск	Воронежская, Каменная Степь
Приходящая за период «всходы – цветение» ФАР (Q_f), МДж/м ²	644	592	596
Поглощенная ФАР (Q_{Af}), МДж/м ²	515	473	477
Используемая ФАР в фотосинтезе и запасаемая в биомассе (Q_M), МДж/м ²	26	24	24
Максимально возможная продуктивность (M), ц/га	155	143	143
Максимально возможная урожайность (M_3), ц/га	51	48	47

Отсюда следует, что термический режим при всей своей вариабельности в период вегетации за 1996-2010 гг, не внес существенного вклада в МВП, которая практически полностью обусловлена приходом и использованием ФАР.

Для оценки МВУ необходимо знать K_{xoz} – долю урожая (т.е. зерна) в M посевов. Примем, что массовая доля зерновок M_3 колосьев в общей массе растений (K_{xoz}) в условиях ЦЧО составляет в среднем 30% (Гончаров, Гончарова, 2009). Она может быть больше (до 40-42%) у сортов, высеваемых в южных регионах, где больше не только сумма прихода ФАР за период ФД, но выше в середине дня интенсивность ФАР, «укорачивающая» стебель; K_{xoz} может быть меньше (25-30%) при пониженном приходе ФАР (облачность, загущенность посевов), вызывающем световую «этиоляцию» стебля со снижением размеров и массы колоса.

Итак, принято, что среднеголетняя радиационно обусловленная МВУ составляет в ЦЧО 47-51 ц/га (табл. 2). С учетом прихода ФАР в период молочной спелости, в течение которой колос еще может вносить свою лепту (5-10%) в фотосинтез, МВУ достигала бы 50-55 ц./га. Такой уровень урожайности отвечает

желаемым значениям в моделях «идеальных» сортов (Кумаков, 1985; Гончаров, Гончарова, 2009). Эти расчетные величины МВУ совпадают с фактической урожайностью в ряде хозяйств НИИСХ, где в отдельные годы она достигала 60-70 ц./га.

По исходно принятым условиям, для получения МВП почвенная влага не лимитирует фотосинтез и транспирацию и, согласно уравнению ЭБ, при КПД_а, равном 5%, на Q_т расходуется 93-94% поглощенной ФАР, что составляет 420-490 МДж/м² (табл. 3).

Таблица 3.

Компоненты энергетического баланса, влагообеспеченность, транспирация и урожайность ранних яровых зерновых культур в среднем за период 1996-2010 гг.

Компоненты баланса	Область, станция			
	Курская, Петринка	Тамбовская, Мичуринск	Воронежская Каменная Степь	Средние значения
Расход поглощенной ФАР на максимально возможную транспирацию (Q _т), МДж/м ²	489	450	418	452
Расход влаги на максимально возможную транспирацию (Т), в мм	219	201	203	208
Сумма осадков за период «всходы-цветение», мм	101	118	87	102
Запасы продуктивной влаги в почве (0-100 см) в фазу «всходь», мм	214	197	213	208
Запасы продуктивной влаги в почве (0-100 см) в фазу «цветение», мм	158	138	138	145
Расход влаги на действительно возможную транспирацию (Т), мм	158	160	154	165
Соотношение между действительно возможной и максимально возможной транспирацией	0,72	0,80	0,76	0,79
Фактическая влагообусловленная урожайность, ц/га	37	38	36	37
Расчетная (по элементам продуктивности) урожайность, ц/га	37	36	36	36

Отсюда, рассчитав количество влаги, идущей на Т и соотнеся ее с величиной М, получим значения транспирационного коэффициента (ТК), равного 130г воды/г М и продуктивности транспирации (ПТ), составляющей 7,7 г М/кг испаряемой воды. Значения ТК очень близки к минимально, а ПТ – к максимально возможным величинам

и согласуются с экспериментальными данными для посевов яровой пшеницы и ячменя в оптимальных условиях роста (Грингоф, Клещенко, 2011; Кошкин, 2010).

Таким образом, на основе агрометеорологической информации и анализа ЭБ можно получить представление о среднемноголетнем уровне МВП и МВУ посевов в том ли ином регионе и минимально необходимом для них уровне влагопотребления и транспирации.

В то же время, фактическая урожайность весьма варьировала, что, в частности, могло быть связано, при оптимальности всех других условий, с различным приходом Q (табл. 4).

Таблица 4.

Приход максимальных и минимальных месячных сумм суммарной интегральной радиации Q и средние значения за период 1996-2010 гг.

Область, Станция	Максимальные суммы, МДж/м ² ·месяц			Минимальные суммы, МДж/м ² ·месяц			Средние значения, МДж/м ² ·месяц		
	май	июнь	июль	май	июнь	июль	май	июнь	июль
Курская обл., Петринка	<u>691</u> 2005	<u>747</u> 2010	<u>697</u> 2010	<u>445</u> 2004	<u>503</u> 2001	<u>517</u> 1997	586	637	610
Тамбовская обл., Мичуринск	<u>684</u> 1996	<u>777</u> 1997	<u>765</u> 1996	<u>435</u> 1999	<u>471</u> 2001	<u>506</u> 2004	587	655	647
Воронежская обл., Каменная Степь	<u>740</u> 2007	<u>775</u> 1999	<u>805</u> 1996	<u>476</u> 2004	<u>468</u> 2003	<u>499</u> 2004	628	647	661

В знаменателе указан год.

Рассмотрим поэтому диапазоны МВП и МВУ, обусловленные лишь различным приходом и использованием ФАР.

Вначале покажем еще большие возможные значения потенциальных (МВУ) урожаев:

- ✓ Приход Q , как и Q_f , может быть больше примерно в 1,25 раза (табл. 1);
- ✓ Значение A_f может реально быть не 0,80, а 0,83, т.е. в 1,04 раза больше;
- ✓ Значение Π_{Af} может быть не 5%, а около 6,0% и даже 6,5%, т.е. в 1,2 раза больше;
- ✓ В итоге величина МВП возрастет в 1,56 раза, что составит не 147, а 229 ц./га.

В условиях большего прихода ФАР может формироваться более мощный и устойчивый стебель, выдерживающий и больший колос, так что $K_{\text{хоз}}$ может быть не 30, а, что допустимо, 33-35%. Тогда МВУ составил бы не 49 ц/га, как дано в табл.2, а возрос, примерно, до 70-75 ц/га. Такие урожаи зерна ярового ячменя и наблюдались в некоторых регионах в отдельные, наиболее благоприятные годы, к тому же – при регулярной оптимизации условий роста.

Теперь обратимся к наименее оптимальным радиационным условиям:

- ✓ Приход Q , как и Q_f , может быть меньше средних значений в 1,35 раза (табл. 1);
- ✓ Значение A_f при меньшем Q может быть не 0,80, а 0,75, т.е. в 1,07 раза меньше;
- ✓ Значение Π_{A_f} может быть не 5%, а 4-3% и менее, но при 4% оно в 1,25 раза меньше;
- ✓ В итоге максимально возможная продуктивность M могла бы снижаться в 1,8 раз, что составило бы не 147, а 81 ц./га.

В условиях сниженного прихода ФАР формируется весьма тонкий стебель, с меньшей в сечении площадью механических тканей (Шульгин, 1988), что обуславливает меньший по размерам и массе колос, так что $K_{\text{хоз}}$ может составлять 24-27%. Тогда МВУ составила бы около 20-22 ц./га.

Итак, только за счет различий в приходе и использовании ФАР в те или иные годы МВУ могла бы варьировать в пределах 20-70 ц./га при оптимальности всех других условий за тот же период активной ФД, в те же сроки вегетации.

Наибольшие значения МВП и МВУ рассчитаны для чрезвычайно благоприятного сценария (с «экстремальными» условиями) и они несколько завышены. Во-первых, период активной ФД, как и «всходы-созревание», будет короче, т.е. меньше суммы Q и Q_{A_f} ; во-вторых, ежесуточные продуктивные ресурсы ФАР, обеспечивающие положительный газообмен посева за сутки, всегда меньше измеряемых сумм Q и принятых в расчет Q_f (Шульгин, 2009); в-третьих, нет снижения P' за счет полуденной депрессии транспирации и т.д.

Занижены и наименьшие значения МВП и МВУ: не учтено, в частности, что при меньшем приходе ФАР период «всходы-

молочная спелость» должен быть более длительным и, следовательно, большим приход Q . Поэтому, в первом приближении, можно говорить о диапазоне годовых МВУ пшеницы и ячменя в ЦЧО порядка 25-60 ц/га в отсутствие каких-либо лимитирующих рост факторов, помимо изменчивости приходящей ФАР.

Существует еще ряд радиационных ситуации, пока не рассматриваемых и не учитываемых в ЭБ, но способных влиять на ежесуточные приросты M и, в итоге, на радиационно обусловленную действительно возможную продуктивность (ДВП). Покажем сказанное на нескольких примерах.

Так (пример 1), при равном значении Q_{Af} , на величину МВП и ДВП большое влияние может оказывать структурная организация посева – распределение в нем листовой поверхности, влияющей на профиль ослабления ФАР по глубине ценоза, на интенсивность P' и R (Росс, 1975; Тооминг, 1977; Шульгин и др., 1975).

Дело в том, что на пути луча прямой радиации не должно находиться больше 2-х друг под другом листьев, так как даже в полдень приходящая ФАР к третьему листу слишком мала (менее 1-2% от Q_f) для положительного газообмена в это время дня (тем более за сутки) и этот лист «живет» за счет других листьев (Шульгин и др., 1975).

Пропускание ФАР посевом к почве в такой ситуации при $LAI=2$ «стремится» к нулю. Если же ориентация листьев в посеве по глубине «хаотична» (равномерна) по углу наклона каждого из них и они направлены плоскостью на полусферу неба, то в этом случае LAI равен 4-5 при двух «монослоях» листьев (Шульгин и др., 1975) и к почве поступает около 5-7% от Q_f (Росс, 1975).

Иначе говоря, в обоих случаях Q_f , как и Q_{Af} одинаковы, но в одном случае ФАР ослабляется до уровня почвы и не до нуля, а в другом ее поступление завершается в глубине посева, что негативно сказывается на продуктивности посева.

Допустим (пример 2), что с появлением всходов приход Q в течение 3-5 дней значительно выше среднемноголетних значений, к которым адаптированы сорта. В этом случае индуцируется формирование более мощного по арматурным параметрам стебля, что заранее позволяет ожидать, при прочих оптимальных условиях, высокой ДВП. Однако, следует учесть, что в данной ситуации могут

ускоряться рост и органогенез, укорачиваться период ФД при меньших Q_f , возрастет асинхронность формирования цветков и зерновок. Колос по количеству и массе полноценных зерновок окажется меньшим, чем это можно было ожидать и, в итоге, реализуется меньшая ДВП и ДВУ посева.

Допустим (пример 3), что в течение дня в разное его время имеет место переменная облачность. При одной и той же сумме Q_f газообмен и прирост массы за сутки будет различным в зависимости от режима $Q_f = S' + D$ в течение дня. Пусть в первом случае $S' + D$ поступает с 10 до 12 и с 16 до 18 часов, тогда как в остальное время приходит лишь рассеянная радиация D . Пусть в другом случае $S' + D$ поступает с 12 до 16 часов, а в остальное время только D . В первом случае газообмен и прирост массы за сутки будут больше, чем во втором, так как ЭИ ФАР в дополуденные и послеполуденные часы велика, как велика она и в полуденные часы, т.к. при приходе только D не возникает депрессии T и P' . Во втором же случае к посеву приходит сниженная эффективная Q в виде D (с 10 до 12 и с 16 до 18 часов), тогда как в полуденные часы высокая интенсивность $S' + D$ даже при достаточных ЗПВ в почве приводит зачастую к снижению газообмена за счет частичной депрессии T и, в итоге, к снижению прироста M за сутки.

В дополнение можно добавить, что еще большие различия в реакции растений были бы при равном количестве часов солнечного сияния (КЧСС) в течение дня, особенно при облачности в разное время дня. Понятно, что сумма $S' + D$ за период с 6 до 9 и с 17 до 20 часов будет значительно меньше, чем за такой же период с 9 до 15 часов, тогда как прирост массы за день может быть равным или даже большим в первом случае за счет высокой ЭИ ФАР.

Из этого примера, часто реализуемого в том или ином виде, следует, что между КЧСС и Q за сутки нет однозначной зависимости и ее может не быть в течение ряда дней в декаду, в период ФД данного года. Поэтому расчет прихода Q по КЧСС, предлагаемый в ряде работ (Сивков, 1968; Шиловцева и др., 2005) может производиться, по-видимому, в основном для средних величин многолетнего ряда актинометрических данных.

Допустим (пример 4), что на фоне глобального потепления климата будет происходить потепление в ЦЧО, сопровождаемое в

том числе удлинением теплого периода и позволяющее высевать те же ранние яровые злаки на несколько дней раньше. Между тем продуктивность при этом значимо не возрастет, поскольку каждому из сортов в оптимальных условиях присущ детерминированный рост, всегда постоянное количество междоузлий и листьев, длительность межфазных периодов.

К тому же, при более раннем севе всходы фотопериодически длиннодневных растений будут находиться на более коротком дне, в результате чего может возникать некоторая задержка развития на 1-2-м этапах органогенеза, усиливаться метамеризация, кущение и за счет появления дополнительных побегов может происходить загущение посевов, увеличиваться их оптическая плотность, ухудшаться профиль пропускания ФАР в глубину, снижаться истинный фотосинтез у нижних ярусов листьев, что в итоге, уменьшит ДВП и ДВУ. Чтобы подобной ситуации не возникало, придется, по-видимому, снижать норму высева семян, что определит лишь ту урожайность, какую может обусловить приход солнечной радиации за период ФД. При этом истинный фотосинтез посевов сохранится почти на том же уровне, тогда как дыхание возрастет и ДВУ тем более будет снижаться.

Поэтому, наряду с ранее указанными задачами оценок МВП и МВУ, при решении которых учитываются именно суммы Q_f за период ФД, без детализации ее прихода в течение ФД посева, есть необходимость принимать во внимание и значительную вариабельность прихода Q_f в те или иные периоды ФД. Понятно, что при одной и той же Q_f она в отдельные фазы избыточна, тогда как в другие недостаточна и это может сказаться, причем в разной степени, на ДВП (т.е. как радиационно обусловленную ДВП).

Наряду с влиянием ФАР на сугубо ФД, она, наряду с областью 710-750 нм, играет большую роль в регуляции информационно-регуляторных физиологических процессов (Q_{ir}), сигнализируя растениям о радиационной среде в данный и последующий моменты и влияя через скорость органогенеза на продуктивность (Алехина и др., 2005; Шульгин, 2004). Это влияние проявляется, например, при регуляции фотопериодической реакции зацветания, в «критические» периоды роста растений.

Так, многолетними исследованиями выявлено, что после всходов в течение 3-5 дней, в «первый критический радиационный период» (Шульгин, 2004) первые два листа яровой пшеницы и ячменя очень чувствительны к интенсивности ФАР (Шульгин, Щербина, 1988).

Снижение прихода ФАР к всходам (всего лишь на 2-4% от прихода за период активной ФД), как и фотопериодически неоптимальная физиологическая длина дня (Шульгин, 1973) существенно, причем «отрицательно», влияет на закладку, количество элементов и свойства тканей будущего стебля, определяющих его устойчивость, на размеры и структуру листьев и, в итоге, – на размеры, количество колосков, цветков, зерновок и массу колоса (Шульгин, Щербина, 1988) и обуславливает снижение ДВП растений на 20-30%.

Такие изменения, негативные с хозяйственной точки зрения, адаптивны и позитивны для растений, позволяя им расти в условиях «ожидаемого» снижения прихода ФАР, иметь для этого меньшую массу дышащих органов и сохранять сопряженность основных процессов за сутки, работая с максимальной ЭИ ФАР.

В реальной ситуации ДВП и ДВУ существенно зависят не только от радиационных параметров ЭБ, но и от Q_T (влагообеспеченности растений и их транспирации). Дело в том, что у пшеницы и ячменя транспирация осуществляется лишь на свету, зависит от ФАР (т.е. является фототранспирацией, T_f) и будучи функционально и пропорционально связанной с процессами истинного фотосинтеза (Шульгин, Мурей, 1978; Шульгин, 2004) она может, при недостатке подаваемой влаги из почвы в листья, снижаться сама, снижать газообмен P за счет P' и прирост M .

Это снижение T_f , вызываемое необходимостью не допустить «обезвоживания» листа, требует пропорционального уменьшения затрат энергии на P' во избежание ее избытка, направляемой в этом случае не на T , а на нагрев структур хлоропластов и, чтобы этого не произошло, в околополуденные часы у листьев может наблюдаться депрессия фотосинтеза, вызванная депрессией T . Одним из регуляторов этих взаимообусловленных процессов выступает устьичный аппарат (Молдау, 1977): уменьшая T , он

одновременно снижает поступление CO_2 в лист, P' и снижает затраты $Q_{\text{Аг}}$.

Итак, если снижается величина суммарной транспирации, то почти в той же мере снижается P и прирост M (Шульгин, 2004; Кошкин, 2010), но при этом может ухудшаться тепловой режим растений (Клешнин, Шульгин, 1960).

В таком случае энергобалансовый подход позволяет сопоставить радиационно обусловленные МВП и МВУ с влагообусловленной ДВП, решающим фактором величины которой теперь выступает водный режим растений.

В табл. 3 представлены данные о величине расхода влаги на транспирацию за период роста, необходимой прежде всего для реализации МВП.

Из уравнения водного баланса следует (Тарасова, Шульгин, 2010), что, исходя из ЗПВ в метровом слое почвы, фактическое влагопотребление посевами за период роста меньше (табл. 3) и фактически возможная T составит не 200-220 мм, а в среднем 165 мм. Отсюда, на основе соотношения $T_{\text{факт.}}/T_{\text{потенц.}}$, можно уменьшить величину $M_{\text{потенц}}$ и $M_{3, \text{ потенц}}$ и получить расчетные значения влагообусловленной урожайности порядка 37 ц/га (табл. 3), полностью совпадающей с расчетной по наблюдаемым (экспериментально измеряемым) на агрометеорологических станциях элементам фактической урожайности посевов.

Обратимся теперь, с позиции оценки компонентов приходной части ЭБ, к весьма актуальному вопросу – есть ли основания ожидать увеличения продуктивности в ЦЧО этих же яровых культур в ближайшие десятилетия. Для этого сопоставим значения основных параметров ЭБ посевов в период 1996-2010 гг. с таковыми в 1960-1980 гг., а так же рассмотрим изменчивость значений прихода Q в 1996-2010 гг., базирующихся на фактических данных, полученных на актинометрических гидрометеорологических станциях ЦЧО.

Увеличение среднегоголетнего «потолка» МВП и МВУ могло бы иметь место при увеличении в те же месяцы вегетации прихода Q . На рис. 1 приведены среднемесячные суммы прихода Q для станции «Каменная Степь» за период 1996-2007 гг. и сопоставлены с данными для этой же станции за период 1960-1980 гг., взятых из Научно-прикладного справочника по климату СССР (1990).

Видно, что значения Q за оба периода близки и различия между ними в мае-июне не превышали 3-5%. Аналогичная ситуация имела место и в отношении других станций ЦЧО («Курск», «Мичуринск»).

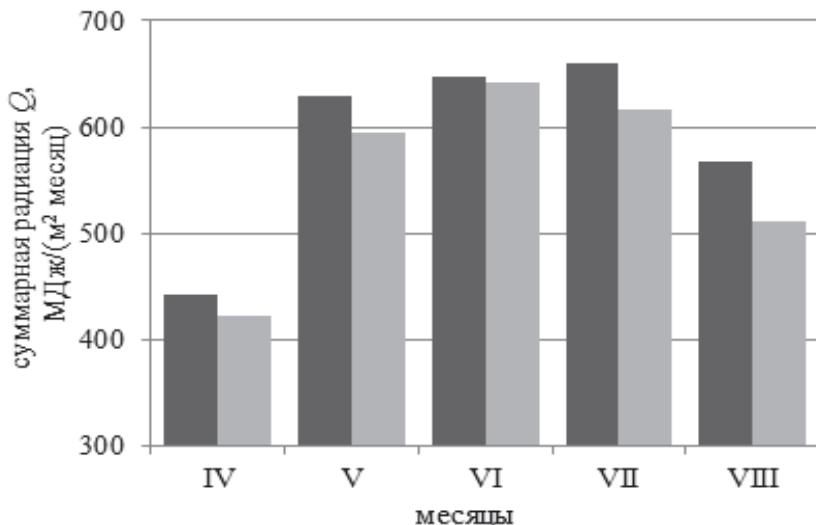


Рис. 1. Суммарная солнечная радиация Q (месячные суммы). Каменная Степь (Воронежская область). Черным цветом обозначен период 1996-2007 гг., серым цветом – 1960-1980 гг.

На рис. 2 представлены месячные суммы Q за период с 1996 по 2010 гг. по данным станции «Мичуринск». В мае и июле, несмотря на межгодовую изменчивость Q , линейный тренд практически отсутствует и очень слабо выражен в июне.

Незначительно выраженный положительный тренд прихода Q в данный период может быть связан с рядом причин: во-первых, с возможным изменением в ЦЧО режима облачности в течение дня и, во-вторых, что мало вероятно, но возможно, с возрастающими «погрешностями» измерений Q в силу «возрастного» снижения чувствительности термоэлементов пиранометров, особенно при высокой температуре воздуха в послеполуденные часы дня, что, в принципе, может приводить к завышению результатов.

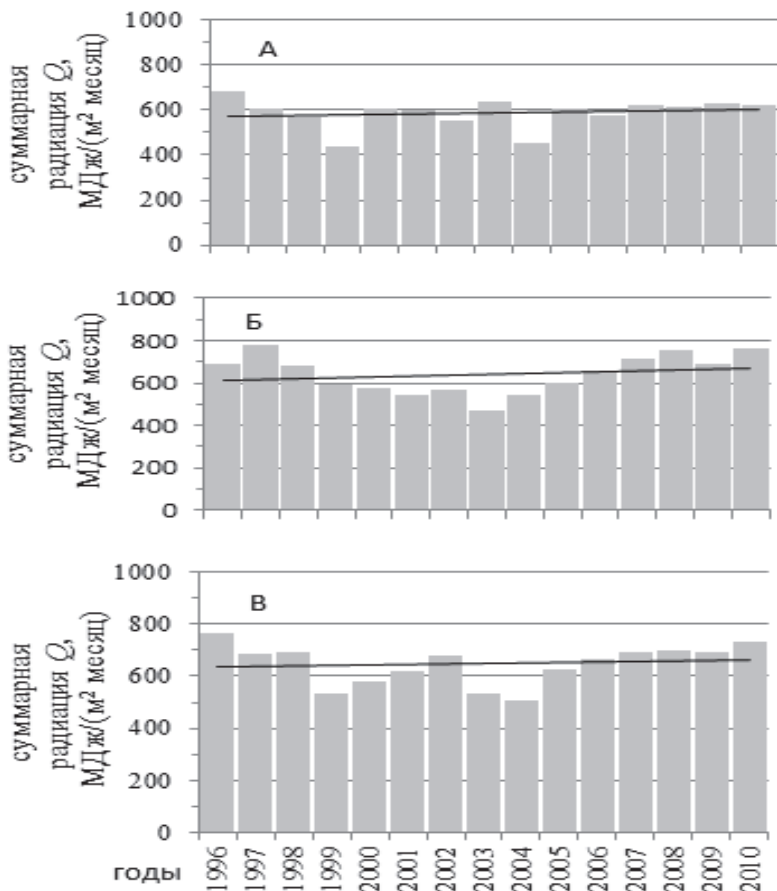


Рис. 2. Месячные суммы суммарной солнечной радиации Q . Мичуринск (Тамбовская область)

A – май, уравнение тренда $y = 1,756x + 573,2$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0,014$

Б – июнь, уравнение тренда $y = 4,160x + 607,4$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0,040$

B – июль, уравнение тренда $y = 1,985x + 631,5$

достоверность аппроксимации $R^2 = 0,013$

Такая же картина, как и в ЦЧО, наблюдалась во второй половине 20-го века и в Нечерноземной зоне: по данным Метеообсерватории

МГУ в период с 1955 по 2007 гг. тренд суммарной радиации практически отсутствовал (Абакумова и др., 2012). В Центральном регионе Европы (23 станции) в период 1964-1989 гг. Q снижалась на 1-3%, а затем ее величина вернулась к значениям 60-х годов (Самукова, 2012) за счет изменения количества аэрозоля в атмосфере и облачности.

Итак, среднемноголетний приход Q во второй половине 20-го века в период вегетации яровой пшеницы и ячменя в ЦЧО практически не изменился и, по-видимому, может сохраняться таким же и в ближайшие десятилетия. Поскольку значения K_f и A_f при этом же Q не могут увеличиваться, то и Q_{Af} останется на прежнем уровне и сохранится, следовательно, существующий уровень МВП и МВУ. Не исключается, что в отдельные годы, при более высоком приходе Q и оптимальности водного режима почвы, уровень МВУ может возрасти, согласно расчетам ЭБ, до 60-70 ц./га, к которому может приблизиться (и порой приближалась) действительно возможная урожайность.

Как ранее показано (Тарасова, Шульгин 2010; Шульгин и др., 2011), основным фактором в ЦЧО, определяющим ДВУ порядка 35 ц./га вместо МВУ в 50-55 ц./га, является недостаток ЗПВ в течение вегетации ранних яровых культур: вместо необходимых для МВП 200-220 мм имелось в среднем 150-160 мм (табл. 3). Возникает вопрос – был ли «стабильным» в течение прошедших десятилетий режим влажности почвы.

На рис. 3 приведены значения многолетних наблюдений месячных ЗПВ в слое 0-100 см, указывающие на увеличение влаги в почвах ЦЧО в течение периода с 1958 по 2009 гг. Этому способствовало увеличение количества осадков в период вегетации (рис. 4), особенно в июне. Вероятно, могло иметь место возрастание количества зимних осадков, снегозапасов (их водного эквивалента), насыщавших почву как в метровом слое, так и на большей глубине (Оценочный доклад ..., 2008; Кислов и др., 2008; Китаев, Кислов, 2008). Во всяком случае, в Восточно-Европейском регионе «...современное потепление не отразилось на количестве воды в снежном покрове» (Конищев и др., 2008).

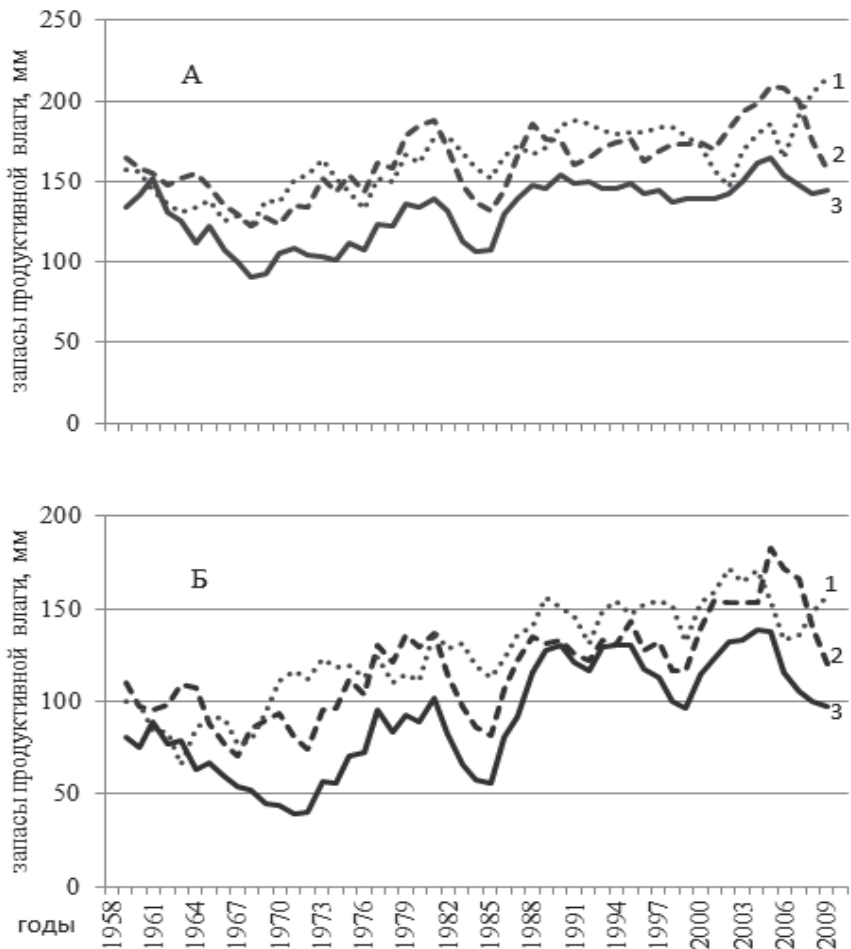


Рис. 3. Трехлетние скользящие средние средних по области запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы под ранними яровыми зерновыми культурами за период 1958-2010 гг. А – май, Б – июнь. Области: 1 – Воронежская, 2 – Тамбовская, 3 – Курская.

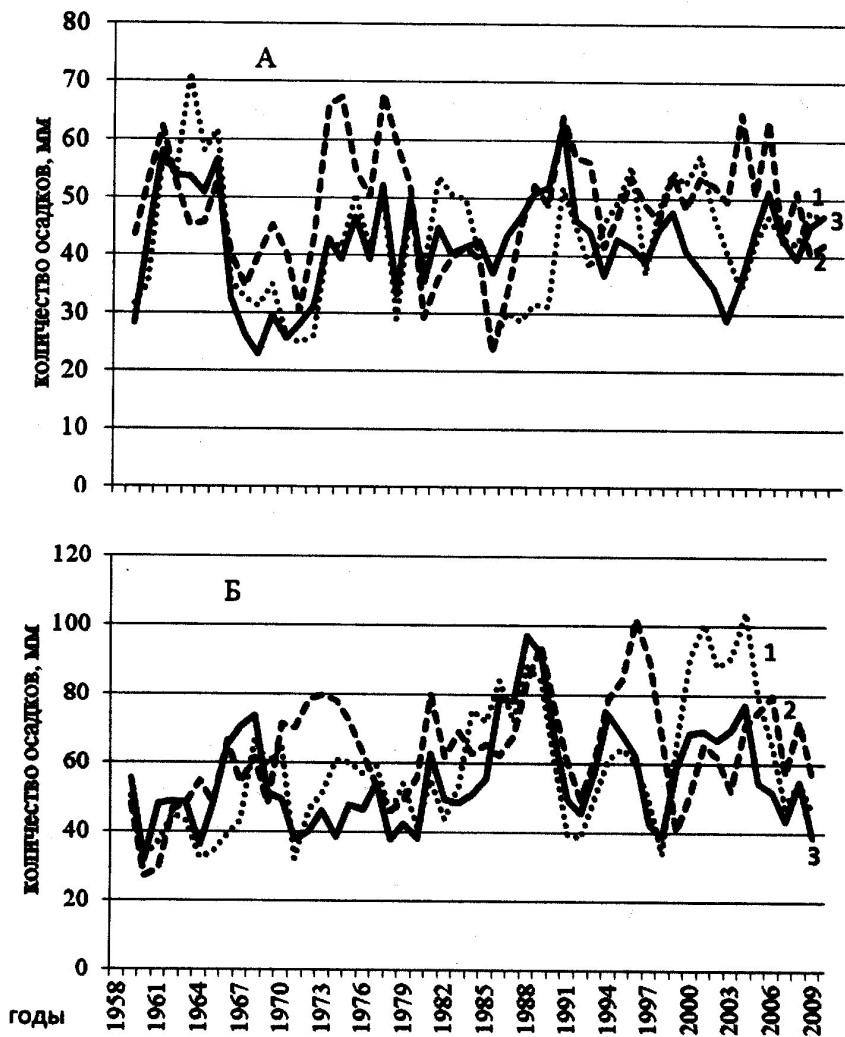


Рис. 4. Трехлетние скользящие средние среднего по области количества осадков за период 1958-2010 гг. А – май, Б – июнь. Области: 1 – Воронежская, 2 – Тамбовская, 3 – Курская.

Повышение ЗПВ в течение этих лет в ЦЧО могло способствовать повышению фактической урожайности яровых культур, но если таковое и происходило, то утверждать о влиянии именно ЗПВ сложно. В этом процессе могли играть роль и повышение культуры земледелия, повышение доз вносимых удобрений и т.д. На расчетную величину урожайности могло, вероятно, сказываться и сокращение площади посевных земель за счет вывода из использования малопродуктивных.

Более того, судя по некоторым материалам (Сиротенко, Павлова, 2012; Павлова, Сиротенко, 2012) урожайность ярового ячменя в Центральном регионе за период с 1975 по 2010 гг. хотя и незначительно, но снижалась.

Поэтому вопрос о последующих изменениях фактической урожайности посевов остается открытым.

Сложность прогнозирования урожайности в будущие десятилетия связана не только с вариабельностью и повторяемостью тех или иных гидрометеорологических режимов в регионах, не только с некоторой неопределенностью будущих изменений климата, но и с оценкой чрезвычайно сложной и неаддитивной реакции растений на совокупность изменяющихся условий, адаптация к которым, если она и происходит, то весьма медленно и, прежде всего, на пользу самим организмам, а не человека с его желанием и надеждой на получение большей продукции.

В заключение можно отметить, что разработанный и используемый энергобалансовый подход к деятельности посевов, учитывающий приход и использование ими солнечной радиации, позволил оценить общую и хозяйственно ценную максимально возможную продуктивность (МВП и МВУ), минимально необходимое количество влаги в почве для получения такой продукции в ЦЧО, а так же выявить реальную урожайность ранних яровых культур, обусловленную, в частности, фактическими запасами почвенной влаги, при прочих оптимальных условиях роста. В то же время, в такой интегративной оценке не учитывается возможность получения несколько иных значений урожайности в силу различной и пока не дифференцируемой эффективности использования ФАР в течение вегетации посевов за счет наличия радиационных, гидротермических и других «критических периодов», влияющих, в итоге, на конечную продуктивность.

Из этого следует, что для более детального рассмотрения подобных вопросов требуются дальнейшие физиолого-метеорологические исследования с выявлением непосредственного участия солнечной

радиации в продукционном процессе в течение всего онтогенеза растений.

Благодарность.

Автор благодарен зав. кафедрой Метеорологии и климатологии Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, доктору геогр. наук, проф. А.В. Кислову; зав. кафедрой Физиологии растений Биологического факультета МГУ д.б.н., проф. Ермакову И.П.; ведущему научному сотруднику ВНИИСХМ д.б.н., проф. Грингофу И.Г.; зав. кафедрой Биофизики Физического факультета МГУ д.ф.-м.н., проф. Твердислову В.А. за постоянное внимание к данному направлению исследований. Автор признателен сотруднику кафедры Метеорологии и климатологии Географического факультета МГУ Л.Л. Тарасовой, работавшей под руководством автора по данной тематике в ходе выполнения диссертационной работы, а так же аспиранту Экологического факультета РУДН Е.П. Простокишиной, за помощь в подготовке материалов для статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В., Незваль Е.И., Шиловцева О.А. 2012. Климатические ресурсы солнечной энергии Московского региона. –М.: Книжный дом «ЛИБРИКОМ», 312 С.
2. Алехина Н.Д., Балнокин Ю.В., Гавриленко В.Ф. и др. Физиология растений. Под ред. И.П. Ермакова. 2005. –М.: Академия, 640 С.
3. Гончаров Н.П., Гончарова П.Л. 2009. Методические основы селекции растений. Новосибирск: Гео. 427 С.
4. Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Сиротенко О.Д. 2006. Биоклиматический потенциал России: теория и практика. –М.: Тов. научн. изд. КМК. 512 С.
5. Грингоф И.Г., Клещенко А.Д. 2011. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Т.1. Обнинск: ФБГУ «ВНИИГМИ-МЦД». 808 С.
6. Гусев Н.А. 1967. Физиология водообмена растений. В кн.: Физиология сельскохозяйственных растений Т.3, –М.: Изд-во Моск. ун-та.. С. 3-86.
7. Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М., Соколихина М.Н., Суркова Г.В., Торопов П.А., Чернышев А.В., Чумаченко А.В. 2008. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления 21-го века. –М.: МАКС Пресс. 292 С.
8. Китаев Л.М., Кислов А.В. 2008. Региональные различия снегонакопления – современные и будущие изменения. Криосфера Земли. Т.12, №2. С. 98-104
9. Клешнин А.Ф., Строгонов Б.П., Шульгин И.А. 1955. К вопросу об энергетическом балансе листьев растений. Физиология растений. Вып. 6, С. 1211-1217.

10. Клешнин А.Ф., Шульгин И.А. 1960. О связи между транспирацией и температурой листьев растений в естественных условиях. Докл. Выездной сессии ОБН в г.Казани. Казань:, КазГУ. С. 46-49.
11. Конищев В.Н., Гребенец В.И., Тумель Н.В., Кислов А.В. 2008. Изменения снежного покрова, многолетнемерзлых пород и инженерно-геокриологических параметров при глобальном потеплении. В кн.: Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления 21-го века. –М.: МАКС Пресс. С. 167-242
12. Кошкин Е.И. 2010. Физиология устойчивости сельскохозяйственных культур. –М.: Дрофа, 638 С.
13. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. 2006. Физиология растений. –М.: Высшая школа. 742 С.
14. Кумаков В.А. 1985. Физиологическое обоснование моделей сортов пшеницы. –М.: Колос. 270 С.
15. Молдау Х.А. 1977. Устьица – универсальные регуляторы фотосинтеза. Физиология растений. Т.24, № 5. С. 969-975.
16. Научно-прикладной справочник по климату СССР. 1990. Серия 3. Многолетние данные. –Л.: Гидрометеиздат. Вып. 28. 365 С.
17. Нийлиск Х.И., Росс Ю.К. 1969. Особенности радиационного режима растительного покрова. В кн.: Общие теоретические проблемы биологической продуктивности. –Л.: Наука. С. 155-159.
18. Ничипорович А.А. 1956. Фотосинтез и теория получения высоких урожаев. Тимирязевские чтения, XV. –М.: АН СССР. 93 С.
19. Ничипорович А.А. 1963. О путях повышения продуктивности фотосинтеза растений в посевах. В кн.: Фотосинтез и вопросы продуктивности растений. – М.: АН СССР. С. 3-38.
20. Ничипорович А.А., Шульгин И.А. 1976. Фотосинтез и использование энергии солнечной радиации. В кн.: Ресурсы биосферы. Т 2. –Л.: Наука. С. 6-55.
21. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2008. Т. I. Изменения климата. –М.: Росгидромет. 227 С.
22. Павлова В.Н., Сиротенко О.Д. 2012. Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России. –С.-Пб.: Труды ГГО им. А.И. Воейкова. Вып. 565. С. 132-151.
23. Росс Ю.К. 1975. Радиационный режим и архитектура растительного покрова. –Л.: Гидрометеиздат. 342 С.
24. Росс Ю.К., Тооминг Х.Г. 1968. Ослабление прямой и суммарной радиации внутри посевов сельскохозяйственных культур и описывающие её полуэмпирические формулы. В кн.: Актинометрия и оптика атмосферы. Таллин: Валгус. С. 283-288.
25. Самукова Е.А. 2012. Тенденции временных изменений суммарной солнечной радиации в Европе. Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. –С.-Пб.: С. 188-204.
26. Сивков С.И. 1968. Методы расчета характеристик солнечной радиации. –Л.: Гидрометеиздат. 232 С.
27. Сиротенко О.Д. 1981. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. –Л.: Гидрометеиздат. 167 С.

28. Сиротенко О.Д., Павлова В.Н. 2012. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства. В кн.: Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. – М.: Росгидромет. С. 165-189
29. Тарасова Л.Л., Шульгин И.А. 2010. Гидро-радиационный режим и урожайность яровых зерновых культур в Центральных черноземных областях и Среднем Поволжье. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. №4. С. 30-33.
30. Тимирязев К.А. 1948. Солнце, жизнь и хлорофилл. –М.: Сельхозгиз. Т. 1, С. 82-692.
31. Тооминг Х.Г. 1977. Солнечная радиация и формирование урожая. –Л.: Гидрометеоиздат. 200 С.
32. Шиловцева О.А., Дьяконов К.Н., Балдина Е.А. 2005. Косвенные методы суммарной фотосинтетически активной радиации по данным актинометрических и метеорологических наблюдений. Метеорология и гидрология. № 1. С. 37-47.
33. Шульгин И.А. 1973. Растение и Солнце. –Л.: Гидрометеоиздат. 252 С.
34. Шульгин И.А. 1988. Архитектура растений и продукционный процесс в оптимальных условиях. Фотосинтез и продукционный процесс. –М.: Наука. С. 115-135.
35. Шульгин И.А. 2002. Радиационные и физиологические параметры продуктивности агрофитоценозов. –М.: Изд-во Моск. ун-та. 57 С.
36. Шульгин И.А. 2004. Лучистая энергия и энергетический баланс растений. Фитометеорологические и эколого-географические аспекты. –М.: Альтекс. 141 С.
37. Шульгин И.А. 2009. Солнечные лучи в зеленом растении. Физиолого-метеорологические аспекты. –М.: Альтекс. 217 С.
38. Шульгин И.А., Клешнин А.Ф., Щербина И.П. 1960. Энергетический баланс листьев растений в естественных условиях. Вестн. МГУ. Сер. 6. Биол. Почвовед. №6. С. 26-32.
39. Шульгин И.А., Климов С.В., Ничипорович А.А. 1975. Об адаптивности архитектуры растений к солнечной радиации. Физиология растений. Т. 22, Вып. 1. С. 40-48.
40. Шульгин И.А., Мурей И.А. 1978. Поглощение лучистой энергии и транспирация зеленого листа. Биол. Науки. №2. С. 101-111.
41. Шульгин И.А., Тарасова Л.Л. 2009. Агрометеорологические аспекты энергетического баланса растений и агрофитоценозов. В кн.: Агрометеорология XXI века. –М.: Изд. РГАУ-МСХА. С. 32-43.
42. Шульгин И.А., Щербина И.П. 1981. Адаптивность продуктивности пшеницы. Биол. Науки. №10. С. 5-22.
43. Шульгин И.А., Щербина И.П. 1988 К теории энергетических ресурсов продукционного процесса. Вестн. МГУ. Сер. 5. Геогр. №2. С. 28-35.
44. Шульгин И.А., Щербина И.П. 1990. Использование энергетических ресурсов в ходе продукционного процесса пшеницы. Биол. Науки. №9. С. 71-82.
45. Шульгин И.А., Тарасова Л.Л., Сенников В.А. 2011. Агрометеорологические аспекты оценки урожая в условиях климатических изменений. В кн. Адаптация сельского хозяйства России к меняющимся погодно-климатическим условиям. –М.: Изд. РГАУ-МСХА. С. 90-100.