

СОЛНЕЧНАЯ РАДИАЦИЯ В ОЦЕНКАХ МАКСИМАЛЬНОЙ УРОЖАЙНОСТИ ЯРОВЫХ КУЛЬТУР

И.А. Шульгин^{1*}, Р.М. Вильфанд², А.И. Страшная²,
О.В. Береза²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;

² Гидрометеорологический научно-исследовательский центр

Российской Федерации, Москва, Россия

* Эл. почта: ufarin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 14.09.2015; принята к печати 27.11.2015

Рассмотрен физиолого-метеорологический энергобалансовый подход к оценке прихода к посевам солнечной радиации, включая фотосинтетически активную радиацию (ФАР), и ее использования на фотосинтез, влагопотребление и транспирацию, теплообмен со средой, регуляторно-информационные фотобиологические процессы, фотоморфогенез. Этот подход позволяет определить максимально возможную продуктивность (МВП) и урожайность (МВУ) яровых зерновых культур в оптимальных по другим параметрам условиях роста. Отмечена роль критических радиационных периодов (КРП) в онтогенезе растений и возможность их учета в новых методах агрометеорологических прогнозов урожайности. Проведен расчет прихода ФАР за период от всходов до конца цветения к посевам пшеницы и ячменя для Московской, Курской, Тамбовской, Воронежской, Самарской, Саратовской областей. Показано, что величина МВП может составлять 130–140 ц/га, а МВУ – 38–42 ц/га. В оптимальных условиях более 90% ФАР расходуется на транспирацию (Т); для получения МВП необходимо использовать на Т около 180 мм влаги в 1 м слоя почвы. Так как у пшеницы и ячменя Т осуществляется лишь на свету и пропорциональна газообмену, при снижении запасов продуктивной влаги (ЗПВ) в той же мере снижается Т и газообмен. Рассчитана максимально возможная действительная урожайность: 38–40 ц/га в Московской и Курской, 31–33 ц/га в Тамбовской и Воронежской и около 28 ц/га в Самарской и Саратовской областях. Подчеркивается, что снижение прихода ФАР и ЗПВ снижает газообмен и прирост массы, особенно в критические радиационные периоды онтогенеза, и поэтому учет ФАР важен как для оценки состояния посевов, так и прогноза возможной урожайности.

Ключевые слова: солнечная радиация, яровые зерновые культуры, энергетический баланс посевов, газообмен, влагообмен, максимально возможная продуктивность, максимально возможная урожайность, критические радиационные периоды, динамические модели продукционного процесса.

SOLAR RADIATION IN ESTIMATING THE MAXIMAL YIELDS OF SPRING CROPS

I.A. Shulgin^{1*}, R.M. Vilfand², A.I. Strashnaya², O.V. Bereza²

¹M.V. Lomonosov Moscow State University and ²Hydrometeorological Research Center, Moscow, Russia

*E-mail: ufarin@yandex.ru

The paper presents an approach to estimating the input of solar radiation to crop yields based on plant physiology, meteorology and energy balance with account of the photosynthetically active radiation (PAR) and its allocation to photosynthesis, water absorption, transpiration, heat exchange with the environment, regulatory and informational photobiological processes, and photomorphogenesis. The approach makes it possible to estimate the maximal possible productivity (MPP) and crop yield (MPY) of spring cereals under conditions optimal with regard to all other environmental factors. The role of critical illumination periods (CIP) in plant ontogenesis and the possibility to account of them in the novel approaches to agro-meteorological forecasting or crop yields. PAR inputs to wheat and barley crops over the time elapsing from coming-up to the end of flowering are calculated for Moscow, Kursk, Tambov, Voronezh, Samara, and Saratov regions. The resulting MPP and MPY may be 13 to 14 and 0.38 to 0.42 tons per hectare, respectively. Under optimal conditions, over 90% of PAR is allocated to transpiration (T). To reach MAP, about 180 mm of water per 1 m of soil must be used for T. Because in wheat and barley T occurs only under illumination and is proportional to gas exchange, a decrease in productive water store (PWS) is associated with a similar decrease in T and gas exchange. The calculated maximal actual yields (tons per hectare) are 0.38-0.40 in Moscow and Kursk regions, 31-33 in Tambov and Voronezh regions, and about 0.28 in Samara and Saratov regions. Noteworthy is that decreases in PAR and PWS are associated in decrements in gas exchange and mass gain, especially during critical periods of ontogenesis; therefore, accounting of PAR is important for assessing the conditions of crops and for forecasting possible crop yields.

Keywords: solar radiation, spring cereals, energy balance of crops, gas exchange, water exchange, maximum possible productivity, maximum possible yield, critical illumination period, dynamic models of productivity

«Мы можем доставить растению сколько угодно удобрений, сколько угодно воды, можем, пожалуй, обогреть 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...»

К.А. Тимирязев

Введение

Выращивание однолетних яровых культур, особенно злаков, важно не только с практической стороны, но и с научной, поскольку их посевы могут служить хорошим объектом изучения продукционного процесса и возможностей его оптимизации. Они моновидовые, при высокой агротехнике быстро растущие, позволяют иметь большое число растений на единицу площади земли, доступных для изучения их структурно-функциональных параметров.

На практике, как и столетие назад во времена А.И. Воейкова, П.И. Броунова, К.А. Тимирязева [2, 4, 30], существует задача определения однолетней, а также среднесезонной (климатической, за 30 лет и более) максимально возможной биологической продуктивности (МВП) и урожайности (МВУ) возделываемых культур в оптимальных условиях роста и сравнения с ней максимально возможной действительной продуктивности (МВДП) с целью выявлять и количественно оценивать причины, не позволяющие получать близкую к максимальной продуктивность в разных физико-географических регионах [22, 31, 32, 34].

Представления об МВП необходимы для того, чтобы знать те климатические условия, при наличии и величине которых могут формироваться в данном регионе однолетняя (ежегодная) и климатическая МВП.

Сопоставление МВП и МВДП может позволять земледельцу обращаться в органы страхования посевов в случаях «недора» урожайности относительно запланированных значений из-за непредвиденных условий.

Величина МВП той или иной культуры зависит, как известно, от трех компонентов: во-первых, от свойств используемых сортов, во-вторых, от агротехнических мероприятий в ходе формирования посевов, и, в-третьих, что особенно важно, от метеоклиматических (МК) параметров среды в период роста и развития растений [5, 7, 8, 28, 31, 33].

Первые два компонента поддаются регуляции и оптимизации, тогда как третий, непосредственно неуправляемый, необходимо учитывать, что требует оценки значимости для растений основных МК режимов – радиационного и гидротермического.

Влага (запасы продуктивной влаги в почве, ЗПВ) может поступать к растениям не только естественным путем, но и при орошении. Солнечная же радиация (СР) – единственный энергетический источник автотрофного питания растений – незаменима, не поддается регуляции человеком и является лимитирующим физиологическую деятельность фактором [30, 32], который определяет МВП при оптимальном значении всех других условий. Под оптимальностью всех других условий необходимо понимать то, что все факторы среды, кроме СР, достаточны и не лимитируют эффективную деятельность растений в течение вегетации данной культуры.

Подчеркивая значимость именно солнечной радиации для получения МВУ, К.А. Тимирязев писал: «... Окончательно непоправимо только расточительное, неумелое пользование главным источником народного богатства – Солнечным светом. Не утилизируя данный момент, он утрачивается уже безвозвратно. Тогда станет понятно, что каждый луч Солнца, не уловленный растениями, а бесплодно отразившийся назад в мировое пространство, – кусок хлеба, выр-

ванный изо рта отделенного потомка, а вместе с тем станет понятно, что владение землей не право или привилегия, а тяжелая обязанность, грозящая ответственностью перед судом потомства» [30].

Основные концептуальные и технические проблемы

Как известно, СР, поглощаемая растениями, совершает многообразную работу, используя в различных высоко- и низкоэнергетических процессах: фотосинтез, дыхание, поглощение влаги и транспирация, теплообмен со средой, фотоморфогенез и т. д.

Формирование биомассы (М), ее количество, качество, энергоемкость обусловлены, прежде всего, совокупностью многочисленных высокоэнергетических процессов фотосинтетической деятельности за счет поступления СР в области спектра 380–710 нм [17, 22–24]. При этом лишь часть поглощенной энергии в ходе газообмена (фотосинтеза и дыхания) запасается в биомассе (М), тогда как другая, значительно большая, расходуется на транспирацию, теплообмен и т. д.

Формирование биомассы хозяйственно ценных органов растений обусловлено также совокупностью многочисленных (более 50–100) низкоэнергетических процессов фоторегуляторной и фотоинформационной деятельности, также совершаемой СР в области 380–750 нм [17, 35]. К ним относятся фотопериодизмы, фототропизмы, фотоактивация и фотореактивация, индукция «биологических часов», фотоморфогенез в целом и т. д.

Многообразие параметров СР, активно действующей на фитоценозы, определяет ее многообразную физиологическую значимость, в том числе для создания оптимальной для самих растений биомассы органов [34].

Между тем, в сельскохозяйственной практике при решении задачи выявления климатически обусловленной МВП в основном анализируются два метеофактора – тепловой и водный режимы воздуха и почвы [20, 25, 27–29], тогда как основной энергетический фактор в деятельности растений – солнечная радиация – остается мало учитываемым, особенно в оперативной работе, хотя в учебниках и пособиях по агрометеорологии все больше отмечается ее важное значение [8], основанное на сведениях из физиологии растений [17].

К сожалению, зачастую принимаются мнения о том, что СР не является лимитирующим фотосинтез и рост фактором, малоизменчива, а если она и изменяется, то это адекватно проявляется в изменчивости термического режима, и что приход СР к растениям – фактор, не поддающийся регуляции.

Необоснованность таких позиций состоит в том, что под «стабильностью» прихода СР в том или ином регионе подразумевается отсутствие многолетнего тренда; однако при этом игнорируется реальная изменчивость прихода СР в отдельные годы, в период вегетации в данном году. К примеру, в ходе непрерывной регистрации СР в Метеорологической обсерватории МГУ установлено, что в Московском регионе тренды многолетних значений суммарной коротковолновой радиации и ФАР за период 1958–2007 гг. практически отсутствуют [1] при значительной межгодовой и внутригодовой их изменчивости, варьирующей за сутки в период ФАД посевов от 15 до 0,9 МДж/м² ФАР.

Не учитывается также, что в данный год (месяц, декаду, день) в данном регионе тепловой режим может обуславливаться адвективным фактором, независимо от прихода СР в этот период. Не всегда учитывается также, что реальное поступление лучистой энергии к растениям посева (насаждениям) определяется не только приходом ФАР над растениями, но и архитектурой самого фитоценоза [26, 35]. Часто ссылаются на то, что существуют трудности измерения СР, отсутствует или труднодоступна измерительная аппаратура и т. д. Действительно, лишь на небольшом количестве ныне существующих метеостанций, ведущих АМ наблюдения, измеряется суммарная СР и ее суточные суммы (Q). Однако существует сеть актинометрических станций Росгидромета, на которых под методическим руководством ГГО им. А.И. Воейкова ведутся регулярные наблюдения прихода СР, регистрируются и оцениваются не только суточные суммы, но и слагающие ее часовые значения [3].

По существу мало принимается во внимание то обстоятельство, что, в сравнении с термическим режимом посевов, их радиационный режим намного изменчивее:

- в течение дня при безоблачном небе интенсивность приходящей суммарной ФАР (I_f) изменяется от сотых долей Вт/м² в гражданские сумерки до 350–400 Вт/м² в полдень;

- в одни и те же часы дня I_f может весьма варьировать из-за облачности, меняющей ее интенсивность в 3–5 раз, причем при переменной облачности практически мгновенно;

- в отличие от температуры воздуха над посевом и внутри него, различающейся не более чем на 0,5–2° в дневные часы, радиационный режим существенно различен: к нижним листьям растений в хорошо сформированном посеве приходит около 3–5% ФАР из 100% над посевами.

Теоретические предпосылки

В данной работе мы, как и ранее, формулируем тезис о том, что, согласно концепции Тимирязева–Броунова о необходимости использования знаний о влиянии МК факторов, в том числе радиационного режима, на структурно-функциональную деятельность растений, есть основание считать, что МВП и МВУ посевов яровых культур при оптимальности всех условий (помимо СР), в том числе при оптимальной агротехнике и достаточном количестве поглощаемой из почвы влаги, определяется реально изменчивым приходом ФАР в течение всего периода фотосинтетически активной деятельности (ФАД) растений в данном году.

В этой связи следует напомнить о том, что К.А. Тимирязев, разработавший еще в конце XIX века принципиальные подходы к оценке потенциальной продуктивности растений (МВП) и опиравшийся на законы сохранения энергии Р. Майера и Г. Гельмгольца, неоднократно подчеркивал, что только на основе изучения энергетики физиологических процессов, баланса поступления и расхода солнечной радиации на рост и развитие растений можно получить количественное представление о максимальной производительности фитоценозов, включая посевы [30].

Под пределом производительности земли, то есть под понятием «МВП» следует понимать, что конечный результат функционирования посева обусловлен

двумя факторами – величиной максимально возможного в данных условиях прихода суммарной ФАР (Q_p) за каждые сутки, за период фотосинтетически активной деятельности (ФАД) и, во-вторых, ее оптимальным поглощением посевом, которое зависит от количества растений на 1 м², оптимальной структуры (архитектуры) растений в посеве и оптимальной плотности посева в целом [9, 26, 33, 38].

Под оптимальной архитектурой и оптико-физиологической плотностью посева необходимо понимать определенное пространственное по его глубине размещение листьев на стебле с их азимутальной и наклонной ориентацией [23, 26, 31, 34], позволяющее ему в радиационно сомкнувшемся состоянии поглощать не менее 80% ФАР, достигая 83–85% в период достижения максимального (оптимального для культуры) листового индекса ($LAI \sim 4\text{--}5 \text{ м}^2 \text{ на } 1 \text{ м}^2 \text{ почвы}$), то есть в период максимальных суточных приростов биомассы. При такой оптико-физиологической плотности посев, как уже отмечено, должен пропускать к поверхности земли около 3–5% I_f от солнца. Такие посевы могут работать эффективно при разных I_f в течение дня. Принимается также, что посевы не испытывают недостатка (или избытка) ни во влаге, ни в минеральном питании и т. д., то есть функционируют в оптимальных условиях.

Следовательно, предел МВП посева за период ФАД – это прежде всего радиационно обусловленная (РО) МВП, определяемая количеством приходящей и поглощаемой ФАР [35]. В данном случае радиационный «предел» – это в естественных условиях, например, в Московском регионе в мае-августе 1980–2000 гг., приход Q_p , имеющий место при безоблачной, сухой и чистой атмосфере с I_f , обычно не превышающей 400–480 Вт/м² лишь в околополуденные часы, и с величиной максимального суточного $Q_p = 15\text{--}16 \text{ МДж/м}^2$ [1].

Выдерживают и используют ли растения такие величины I_f и какие величины являются оптимальными?

Обратимся к известным экспериментальным данным из физиологии растений.

Листья наиболее светолюбивых растений (кукуруза, подсолнечник, сахарный тростник, хлопчатник и др.) при исследовании газообмена, его световых кривых, ориентированные перпендикулярно к потоку ФАР, могут при такой полуденной I_f фотосинтезировать достаточно эффективно лишь несколько десятков минут, после чего газообмен сам и особенно за счет снижения устьичной транспирации (Т) начинает снижаться, а температура тканей листа повышаться [10, 11], что еще более усиливает негативное действие высокой I_f и приводит в итоге к т. н. «полуденной депрессии фотосинтеза» за счет депрессии транспирации.

В действительности же листья светолюбивых растений, особенно верхних ярусов, имеют, как правило, в разной степени выраженную наклонную ориентацию [26, 34], и, чем она больше, тем меньше на одной и той же единице поверхности листа I_f , практически почти никогда не достигающая полуденных значений [35].

Поэтому высокая продуктивность растений, имеющих на стеблях разную ориентацию листьев, обусловлена тем, что они наиболее эффективно, с максимальным КПД газообмена, работают при т. н.

«интенсивности радиации приспособления» [30], отвечающей, как нами было показано, среднелюдиной I_f (примерно 120–150 Вт/м²). В этом случае растения могут хорошо работать в течение дня как при малых (в утренне-вечерние часы), так и при достаточно больших (в околополуденное время) I_f .

Можно считать, что среднелюдиные значения I_f являются тем верхним средним пределом, при котором в естественных условиях оптимально работает фотосинтетический аппарат единицы поверхности листа, и лишь за счет разной площади листьев меняется величина суммарного газообмена на свету.

Порой в публикациях говорится о желательности «улучшения» растений, их фотосинтетического аппарата, интенсификации его деятельности. При этом ссылаются не только на «могущество» науки, но и на результаты работ ряда ученых, проведенных в искусственных условиях фитотронов при выращивании, к примеру, яровой пшеницы при, казалось бы, экстремальной I_f порядка 1200–1600 Вт/м², что в 10–15 раз выше, чем среднелюдная I_f от солнца [24]. Урожайность пшеницы в таких опытах достигала (в расчете на 1 м²) до 200–250 ц/га, то есть увеличивалась всего лишь в 4–5 раз по сравнению с таковой у посевов высокопродуктивных культур в оптимальных естественных условиях.

К сожалению, мало знакомые со светофизиологией растений исследователи не учитывали то, что в таком посеве число растений специально отобранного сорта с особой (почти вертикальной) ориентацией листьев достигало около 2000 на 1 м² (вместо 300–500 в естественных условиях), а площадь листьев превышала 20–25 м² на 1 м² площади «земли» (вместо 4–5 м² на 1 м² в полевом посеве).

В таком искусственно созданном посеве и при такой площади листьев на ее единицу (на 1 см²) приходила в 8–10 раз меньшая интенсивность света (80–120 Вт/м²); таким образом, листья таких растений работали 16 часов при I_f , не превышающих среднелюдиные от солнца. Естественно, что и эффективность использования ФАР (η_f) на формирование биомассы была не выше, чем у продуктивных посевов в естественных условиях [22, 24].

Приведем несколько иные, но сходные по существу данные. Так, в камерах фитотрона Института физиологии растений им. К.А. Тимирязева АН СССР с константными оптимальными условиями водно-корневого питания и ФАР (без близкого инфракрасного >1100 нм), температуре воздуха 23 °С, температуре листьев около 25 °С показана возможность получения очень высокой урожайности ряда культур за короткие сроки [32]. Например, масса зерна (M_z) яровой пшеницы Сiete Церрос 66 была получена нами за 60–65 суток в размере 1,8–2,0 кг/м² (около 200 ц/га) при интенсивности ФАР 120–150 Вт/м², получаемой растениями в течение 24 часов при естественной концентрации CO₂ (0,03%). Если бы ротация посева яровой пшеницы была проведена пять раз за год, то было бы получено, по расчетам, не менее 1000 ц/га абсолютно сухого зерна.

Эти экспериментальные исследования подтвердили вывод К.А. Тимирязева, что именно лучистая энергия солнца – ее интенсивность, а также и суточная доза – определяет верхний радиационный и, возможно, тем самым, при оптимальных условиях, продукционный предел.

Сформулированная К.А. Тимирязевым позиция, открывая принципиально новую программу комплексных совместных исследований физиологов и метеорологов, акцентирует внимание на ряде важных аспектов энергетики растений, условно выходящих за рамки вопроса о МВП культур:

– К.А. Тимирязев постоянно подчеркивал принцип строгого соответствия (равенства) между количеством получаемой (поглощаемой) энергии и ее расходом на физиологические процессы;

– в самом балансе прихода и расхода лучистой энергии растение является активным участником, не только зависящим в своей деятельности от приходной части, но и через использование энергии, на основе саморегуляции интенсивности процессов, адаптационных возможностей, изменения своей архитектуры (строения побега, ориентации листьев и т. д.), способным в определенной мере влиять на интенсивность и количество приходящей радиации к фитоэлементам по глубине посева;

– лишь через представления об использовании энергии, о МВП, на основе материалов о реальной продуктивности посевов можно выявлять причины (факторы) – прежде всего метеоклиматические и (или) агротехнические, селекционно-генетические – в результате действия которых урожайность приближена или не приближена к максимально возможной.

Исходно было сформулировано также положение о том, что ЭБ может связывать воедино все физиологические процессы в организме, позволяя судить об оптимальном (максимальном) и реальном использовании растением не только энергии, но и влаги в зависимости от температуры среды [12, 30, 34].

Экспериментальные исследования компонентов энергетического баланса (ЭБ) листа, растения, посева на основе принципов, сформулированных К.А. Тимирязевым, были проведены в начале 1960-х гг. [11, 12, 40], и был разработан новый физиолого-метеорологический метод, – метод составления и оценки ЭБ в целом, – позволяющий решать вопросы о региональных климатических и однолетних «потолках» МВП [34, 38, 39].

К проблеме энергетики и продуктивности посевов яровых культур с несколько иных позиций в эти же годы (1953–1975) было привлечено в СССР и за рубежом внимание ученых разных специальностей (физиологов и физиков, гидрологов и метеорологов, математиков и почвоведов и др.), объединяемых Научным советом по фотосинтезу при Президиуме АН СССР, председателем которого, заведующий лабораторией фотосинтеза Института физиологии растений им. К.А. Тимирязева академик А.А. Ничипорович разработал общую теорию фотосинтетической деятельности растений как совокупности сопряженных процессов по эффективному использованию СР на формирование высоких урожаев [9, 18, 22, 23, 26, 27, 31, 34].

По существу, было востребовано как для теории, так и для практики получения высокой урожайности классическое положение, высказанное академиком В.Н. Любименко: «...С биологической точки зрения фотосинтез есть прежде всего физиологическая функция организма, ему подчиненная и им управляемая. Кроме того, что особенно важно для биолога, фотосинтез есть только звено в цепи основных функций, совершающихся в организме одновременно

и параллельно и взаимосвязанных друг с другом именно как звенья цепи» [21].

Таким образом, физиолого-метеорологическое направление исследования ЭБ растений можно рассматривать как неотъемлемый компонент общефизиологических представлений о деятельности растений как целостных систем со своей гармоничной архитектоникой процессов, направленных на максимальную в данных условиях экономичность жизнедеятельности.

Солнечная радиация в энергетическом балансе растений

Итак, рассмотрим энергетический баланс (ЭБ), приход и расход энергии на физиологические процессы.

Известно, что они совершаются за счет физиологически активной радиации (ФиАР, 380–750 нм), ее более узкой области – фотосинтетически активной радиации (ФАР, 380–710 нм), хотя за счет последней протекает, кроме истинного фотосинтеза (P_f), также фотодыхание (R_f), фототранспирация (T_f) и часть низкоэнергетических информационно-регуляторных процессов фотоморфогенеза, для которых большую роль играет и область 710–750 нм. Поэтому ЭБ отражает использование энергии прежде всего в диапазоне ФАР.

Само выражение (уравнение) для ЭБ растения или посева за каждые сутки (основную единицу биологического времени) может быть представлено для области ФАР в упрощенном виде следующим образом [11, 34]:

$$[Q \cdot k_f \cdot A_f = Q_{Af}] = [(Q_{Af} \cdot \eta_{Af}) = Q_p = Q_M] + Q_T + Q_{Tr} + Q_{IR}$$

Здесь: Q – приход суммарной интегральной СР (290–4000 нм); k_f – коэффициент перехода от Q к суммарной радиации в области ФАР (Q_p), равный 0,48; A_f – коэффициент поглощения ФАР растением или посевом; Q_{Af} – поглощенная ФАР. В расходной части баланса $Q_{Af} \cdot \eta_{Af} = Q_p$ – доля поглощенной ФАР, идущей на фотосинтез (газообмен по CO_2 , P) в соответствии с коэффициентом эффективности ее использования (ЭИ ФАР) или, что то же, с коэффициентом ее полезного действия (КПД $_{Af}$, η_{Af}).

Фотосинтез P (газообмен) и необходимая для него энергия Q_p – разность между Q_p , используемой на истинный фотосинтез P' (поглощение CO_2 и H_2O , выделение O_2) и расходом энергии Q_R суммарного дыхания R , состоящего из фотодыхания и «темнового», то есть светонезависимого дыхания. Величина Q_p равна запасенной энергии (Q_M) в сухой биомассе M суточного прироста или в конечной величине.

Так как $Q_M = M \cdot q$, где q – энергоемкость (16,8 КДж/г абсолютно сухой биомассы), то отсюда получаем величину биомассы M .

Q_T – энергия, расходуемая на физиологически необходимый и чрезвычайно полезный процесс – на транспирацию T , осуществляемую в листьях на свету (в сопряженных с истинным фотосинтезом единичных процессах) в виде фототранспирации T_f и «темновой» (то есть светонезависимой) термотранспирации T_p , идущей во всех гетеротрофных органах на свету и в темноте.

Процесс транспирации, помимо участия в поглощении влаги корнями, в передвижении в ней мине-

ральных веществ, позволяет фотосинтетическому аппарату в клетке (хлоропластам), не нагревая его, направляя почти 90% поглощаемой и преобразованной энергии ФАР на превращение жидкой воды в парообразную на поверхности клеток в межклеточном пространстве, оставаться «охлажденным» до температуры окружающего листа воздуха [34].

По существу, $Q_T = K_T \cdot T$, где K_T – энергия (теплота) парообразования, а T – интенсивность транспирации. На T_f и T_p , независимо от механизма превращения в этих процессах жидкой воды в парообразную, затрачивается около 2,42 КДж/г при 20–25 °С. Для растений и посева за сутки в период ФАД T почти равна влагопотреблению. За весь же период вегетации в величину T входит поглощаемая влага, представленная, во-первых, подвижной, «свободной» влагой, быстро транспирируемой, во-вторых, временно «запасаемой» в структурах органов в виде «рыхло-» и «прочносвязанной» воды, медленно проходящей через них и также, в итоге, испаряемой при усыхании органов и, в третьих, гигроскопической влагой (около 10–12%), сохраняемой в конечной воздушно-сухой биомассе [10].

При дефиците подаваемой из корней влаги часть энергии, не используемой на P и T_p , идет на нагрев тканевой влаги (Q_i) на свету, и градиент температуры между листом и воздухом может быть больше нуля. Если же дефицита влаги в зоне корней нет (например, при выращивании риса на «затопляемых» или хлопчатника на орошаемых полях), а температура воздуха высока, как и высока интенсивность ФАР, то температура листьев за счет T может быть ниже температуры воздуха.

При оптимальных условиях роста растений (особенно в фитотронах) распределение Q_{Af} на Q_p в расходной части ЭБ примерно таково: за сутки на Q_p идет около 16%, на Q_R – около 6%, так что на Q_p целого организма приходится и запасается в биомассе (Q_M) около 10%, то есть величина КПД $_A$ (η_{Af}) – отношение Q_M к Q_{Af} – достигает 10–12%.

Значение 10%-ного КПД $_A$ ФАР по газообмену и приросту M является близким к теоретическому и фактически максимально возможному для целого растения за сутки вне посева и в посевах, не зависящему от его возраста (до репродуктивной фазы или до окончания ФАД) и видовой принадлежности растений к С-3 или С-4 типу. В посевах продуктивных культур η_{Af} по M может достигать в период C_{max} 12,5%. Посев же в целом за период ФАД может работать с КПД $_A$ порядка 7–8%.

Кстати отметим, что в оптимальных естественных условиях высокопродуктивные культуры работают с КПД ФАР на запасание в конечной биомассе за весь период их вегетации (от всходов до уборки урожая) около 3–5% по приходящей [22] или 4–6% по поглощенной ФАР [34]. По отношению к периоду ФАД η_{Af} может достигать 6–7%.

На влагопотребление и расход поглощенной энергии на фототранспирацию (Q_{Tf}) у таких растений, как пшеница, ячмень, у которых транспирация осуществляется исключительно на свету, приходится 87–88%.

Наконец, небольшая часть (1–2%) Q_{Af} расходуется на многочисленные регуляторно-информационные процессы Q_{ir} , процессы фотоморфогенеза, первая фаза которых протекает за счет очень низких I_f , с ко-

торых утром, еще в сумерки, начинается физиологический день, и ими же он заканчивается [35].

Способность использовать крайне низкие I_f адаптивно обусловлена тем, что в природе растения сталкиваются с «полутемнотой» (в сумерки) перед ночью и после нее, когда ФАД чрезвычайно мала или фактически прекращается, но есть необходимость и возможность с помощью регуляторно-информационной деятельности настраивать на следующий день «биологические часы» и ритмику процессов в соответствии с длиной фотопериода.

По существу, состояние ЭБ при равенстве приходной и расходной его частей – одна из важнейших оптимизационных функций организма в целом, направленная на максимально эффективную работу в текущий момент, а тем более за сутки – основную единицу биологического времени [21, 31, 35].

Из уравнения ЭБ (основной модели ЭБ) следует, что для выявления РО МВП посевов за некий интервал времени необходимо для реальных условий знать, во-первых, численные значения компонентов приходной части ЭБ и, во-вторых, величину ЭИ ФАР (η_{Af}), позволяющую рассчитать количество энергии, запасенной в Q_{Mf} и саму биомассу M , а отсюда – урожайность.

Итак:

– На основе данных о ежесуточном приходе СР, которыми располагает ГГО им. А.И. Воейкова, можно оценить Q за любой период вегетации (за декаду, фазу, этап органогенеза) и, главным образом, за период ФАД культуры в текущем или любом другом году, а также получить среднееголетние значения для этих же периодов ФАД.

– На основе принятого в литературе [1, 34], а также полученного экспериментально значения доли суммарной ФАР в суммарной СР, равной в среднем 0,48, можно все приведенные значения Q выразить в значениях Q_f .

– На основе известных значений коэффициентов поглощения ФАР (A_f) листьями растений, сомкнутыми посевами в целом и, тем более, за период ФАД можно рассчитать количество поглощенной ФАР (Q_{Af}). Значение Q_{Af} с момента радиационного смыкания посева составляет в среднем 80%, достигая к периоду формирования максимального листового индекса в период колошения злаков, к началу цветения, 82–84% [31, 34]. В данной работе A_f принят равным 80%. Об этой величине, то есть оптической плотности посевов, можно также судить на основе знания о характере размещения растений и их количестве на единице площади земли, по величине альбедо в области ФАР, на основе расчетных данных по оптическому дистанционному зондированию посевов со спутников (к примеру, такого показателя, как NDVI) [13, 15].

– На основе известных из физиологической литературы значений максимальных КПД (η_f и η_{Af}) по приходной (Q_f) и (или) поглощенной (Q_{Af}) ФАР у высокопродуктивных посевов за сутки (за декаду и т. д.), выявленных экспериментально как в естественных условиях, так и в фитотронах [22, 34], можно получать величины суточных приростов биомассы, накопления ее за период ФАД и за всю вегетацию в целом, то есть величины M .

– Если принять, что у яровой пшеницы и ячменя доля хозяйственно ценных органов ($K_{хоз}$), то есть масса зерновок колоса, составляет в среднем 30% массы растений в целом, можно получить величину МВУ.

– Если принять известное условие, что практически вся поглощенная ФАР, не используемая на создание биомассы, идет полностью на транспирацию Q_p , обеспеченную запасами продуктивной влаги в почве, и поэтому не расходуется на теплообмен листьев растений со средой, можно получить величину минимально необходимой влаги для транспирации, обеспечивающей формирование РО МВП.

Итак, если известна Q_M (и M), то можно оценить расход энергии на транспирацию (Q_p) и теплообмен (Q_e) для различных условий.

Прежде всего целесообразно оценить среднееголетние значения радиационно обусловленной МВП при оптимальности всех других условий, чтобы затем сравнить с этой «нормой» однолетние значения МВП при других приходах ФАР или же при другом коэффициенте поглощения ФАР посевом.

Такая возможность оценки среднееголетней (климатической) РО МВП и МВУ существует, если имеются данные о приходе ФАР в данном регионе, что позволяет узнать тот «предел» (по К.А. Тимирязеву), на который следует ориентироваться и селекционеру, и земледельцу.

Данные о приходе ФАР и о Q_{Af} позволяют также получить климатические значения минимально необходимых запасов продуктивной влаги (ЗПВ) в почве в течение вегетации в целом и отдельных периодов, расходуемой на процессы, обеспечивающие формирование РО МВП [38, 39].

При тех же климатических значениях прихода ФАР, на основе данных о действительных (реальных) климатических значениях ЗПВ можно получить представление о среднееголетней (климатической) гидро-(влаго)обусловленных (ГО) максимально возможных действительных величинах продуктивности (МВДП) и урожайности (МВДУ), которые реально всегда ниже радиационно обусловленных величин.

Полученные данные о современной климатической РО МВП, ГРО МВП, ГРО МВДП могут использоваться не только в агроклиматической оценке современных урожаев, но и в агроклиматических прогнозах продуктивности и урожайности посевов в будущем при учете климатической тенденции изменения прихода осадков и ЗПВ в том или ином физико-географическом регионе.

По-видимому, может быть весьма значимой, с учетом прихода ФАР, агрометеорологическая оценка причин той или иной урожайности в текущем году:

– на основе данных о реальном, причем меньшем относительно «нормы», приходе ФАР в отдельные дни периода ФАД можно получить представление о «потерях» (недоборе) образуемой в эти дни биомассы, негативно влияющей на дальнейший рост, на величину конечной продуктивности;

– в случае «стабильности» прихода ФАР в течение ФАД, но изменения (снижения) ЗПВ относительно «нормы», можно рассчитать величину «потери» биомассы, произошедших именно в период изменения ЗПВ за счет снижения газообмена, регулируемого, в данном случае, транспирацией.

Эти позиции имеют особую значимость, если, во-первых, необходимо определить конкретные причины (условия) «недобора» урожая и, во-вторых, использовать их при взаимодействии, например, с органами страхования урожаев [14].

Прикладные аспекты

Конкретизируем сказанное, с тем чтобы выделить возможности использования результатов изучения ЭБ как для агроклиматической, так и агрометеорологической оценки причин получения той или иной урожайности.

В качестве примера и обоснования возможности учета ФАР представим материалы для среднемноголетней (климатической) энергобалансовой оценки урожая ранней яровой пшеницы и ячменя для Московской области, входящей в группу центральных нечерноземных областей (ЦНЧО), а также центральных черноземных (ЦЧО) – Курской, Тамбовской, Воронежской, а также областей Среднего Поволжья – Самарской и Саратовской.

Актинометрические ежесуточные данные о приходе СР были любезно предоставлены ГГО им. А.И. Воейкова, а длительность периода ФАД (от всходов до конца цветения к началу фазы молочной спелости зерновок), как и данные о ЗПВ в почве за этот же период, использовали из архива Отдела агрометеорологических прогнозов Гидрометцентра РФ.

Результаты расчетов представлены в табл. 1. Из нее следует, что приход ФАР к посевам был практически одинаков – в Московской и Курской областях период

ФАД был длиннее (60 дней), но с меньшей суточной величиной, а в Саратовской был короче (52 дня), но с большим суточным значением, что связано с климатической спецификой областей по количеству осадков, по облачности, по термическому режиму.

Достаточно подробный анализ ЭБ посевов был проведен за период 1981–2001 гг. [38, 39] и 2001–2013 гг. для оценки климатической РО МВП и МВУ этих культур.

Для посевов КПД ФАР на газообмен и создание биомассы Q_M за период ФАД принят не максимальным (6–7%), но достаточно большим по поглощенной ФАР (5%), или 4% по приходящей ФАР, отвечающим деятельности высокопродуктивных посевов [22, 23].

Тогда из Q_{Af} на Q_M расходуется 22–23 МДж/м², что при энергоемкости абсолютно сухой массы порядка 16,8 КДж/м² отвечает величине общей биомассы к концу периода ФАД около 135 ц/га для всех областей, и среднее значение климатической РО МВУ (при принятом $K_{хоз} = 0,3$) составляет около 39–40 ц/га.

Аналогичная или близкая величина для земледельческой зоны России, выраженная в биоклиматическом потенциале, составляет в среднем около 135 ц/га надземной воздушно сухой биомассы [7] или около 150 ц/га общей биомассы.

Табл. 1

Продолжительность периода фотосинтетической активной деятельности (ФАД) и компоненты энергетического баланса посевов ранней яровой пшеницы и ячменя: среднемноголетние значения

Компоненты баланса	Области					
	Московская	Курская	Тамбовская	Воронежская	Самарская	Саратовская
Продолжительность периода ФАД «Всходы-цветение, начало молочной спелости», дни	60	58	58	55	54	52
Приходящая ФАР за период ФАД (Q_p), МДж/м ²	564	557	557	540	562	582
Поглощенная ФАР (Q_{Ap}), МДж/м ²	451	446	446	432	450	466
Используемая ФАР в фотосинтезе (газообмене) и запасаемая в биомассе (Q_M), МДж/м ²	22,6	22,3	22,3	21,6	22,5	23,3
Максимально возможная продуктивность (РО МВП), M , ц/га при КПД _{Аf} = 5%	135	133	133	129	134	139
Максимально возможная урожайность (РО МВУ), M_3 , ц/га при $K_{хоз} = 0,3$	40,5	40,0	40,0	39,0	40,0	42,0
Используемая ФАР на транспирацию (Q_T) для РО МВП, МДж/м ²	428	424	424	410	428	443
Количество продуктивной влаги в 0–100 см на транспирацию (Т) для РО МВП, мм	177	175	175	169	177	183
Количество продуктивной влаги в почве на действительную максимально возможную транспирацию (Т) для ВО МВП, мм	172	178	130	130	125	122
Соотношение между Т для РО МВП и Т для ВО МВП	0,97	1,02	0,74	0,77	0,69	0,66
Максимально возможная влагообусловленная урожайность, ц/га	39	40	30	30	28	28
Максимально возможная влагообусловленная урожайность (ВО МВП) с учетом дыхания растений после периода ФАД, ц/га	38	39	29	29	27	27

Как мы видим, в климатологическом отношении радиационная и термическая оценка МВП и МВУ дает, как и следовало ожидать, практически одинаковые результаты, поскольку именно радиационный режим тесно связан с термическим режимом за длительный интервал времени [7].

Для оценки МВУ необходимо, как уже отмечено, знать $K_{\text{хоз}}$ – долю урожая (то есть зерна) в M посевов. Мы приняли, что масса зерновок M_z в общей массе растений ($K_{\text{хоз}}$) составляет в среднем 30%. Она может быть больше (до 40–42%) у сортов, высеваемых в более южных регионах, где выше в середине дня I_p , «укорачивающая» стебель; $K_{\text{хоз}}$ может быть меньше (25–30%) при пониженном приходе ФАР (облачность, загущенность посевов), вызывающем световую «этиоляцию» стебля, его утончение и в итоге снижение размеров и массы колоса.

Итак, можно принять, что климатическая РО МВУ яровой пшеницы и ячменя составляет во всех областях около 40 ц/га. С учетом прихода, поглощения и использования ФАР в начале периода молочной спелости, в течение которого колос может вносить свой вклад (2–4%) в газообмен CO_2 , МВУ достигала бы 42–43 ц/га. Такой уровень возможной урожайности несколько ниже желаемых значений в моделях «идеальных» сортов [6, 18].

По исходно принятым условиям для получения РО МВП запасы продуктивной почвенной влаги не лимитируют фотосинтез и транспирацию и, согласно уравнению ЭБ, при КПД_д, равном 5%, на Q_T расходуется 92–93% Q_{Af} (около 428 МДж/м²). Этой энергии, которую необходимо расходовать на T , отвечает в Московской и Курской областях около 173–177 мм ЗПВ. Отсюда, соотнеся T с величиной M , получим значение транспирационного коэффициента (ТК), равного примерно 130 г воды/г M , и продуктивности транспирации (ПТ), составляющей около 7,7 г М/кг испаряемой воды. Расчетные значения ТК очень близки к минимально, а ПТ – к максимально возможным величинам, являющимся, по существу, энергетическими величинами КПД использования поглощенной влаги и полностью согласующимся с экспериментальными данными для посевов яровой пшеницы и ячменя в оптимальных условиях роста [16].

Между тем, в реальной ситуации с изменчивыми условиями среды максимально возможная действительная продуктивность (МВДП) обусловлена не только радиационными параметрами, но и Q_T и T , которые нетрудно рассчитать. Дело в том, что T у яровой пшеницы и ячменя осуществляется лишь на свету, зависит от ФАР (то есть является фототранспирацией, T_p), функционально и строго пропорционально связана с процессами истинного фотосинтеза [34], газообмена, и поэтому она может при недостатке подаваемой влаги из почвы в листья снижать газообмен P и, тем самым, прирост биомассы.

Это снижение T_p (и Q_p), вызываемое физиологической необходимостью не допустить «обезвоживания» листа, разрыва водяного «столба» в сосудах стебля, «дисбаланса» между поглощением и расходом влаги, именно «требует» пропорционального уменьшения затрат поглощенной энергии на фотосинтез P' , чтобы ее избыток для T не шел на нагрев структур листа. Чтобы этого не произошло, в околополуденные часы у листьев может наблюдаться депрессия фотосинте-

за, вызванная депрессией T . Одним из регуляторов этих взаимообусловленных процессов выступает устойчивый аппарат: уменьшая T , он одновременно снижает поступление CO_2 в лист, P' и снижает затраты энергии на прирост массы.

Итак, если по тем или иным причинам должна и может снижаться величина влагопотребления и суммарной транспирации, то почти в той же мере должен и может снижаться P и прирост M .

В таком случае энергетический подход позволяет сопоставить T климатическую ($T_{\text{кл}}$) по РО МВП с T действительной ($T_{\text{д}}$), а ГО МВП с ГО ДВП, решающим фактором которой, после радиационного режима, выступает водный режим растений.

Рассмотрим эту возможность (табл. 1). Минимально необходимые ЗПВ должны были бы составлять 170–180 мм, а действительные климатические ЗПВ в 1 м слоя почвы за период ФАД составляли в разных областях от 170 до 120 мм, то есть они были несколько меньше необходимых для получения РО МВП и МВУ. Следовательно, с учетом пропорциональности транспирации величине газообмена, на такие же величины отношения T действительной к T необходимой меньше климатические действительные радиационно-лагообусловленные МВП и МВУ. При рассмотренном радиационном режиме и соответствующих ЗПВ действительная гидрообусловленная максимально возможная урожайность (ГРО МВУ) равна примерно 39 ц/га; с учетом затрат на дыхание посева после периода ФАД получим в итоге урожайность для Московской и Курской – около 39–40 ц/га, для Тамбовской и Воронежской – 30 ц/га, а для Самарской и Саратовской – 28 ц/га. Следовательно, на фоне максимальной ГРО МВУ запасы влаги определили максимальную ГРО ДВУ.

Таким образом, посева яровой пшеницы и ячменя могли бы при нынешних климатических значениях Q_f и ЗПВ иметь урожайность в ЦНЧО и ЦЧО, кроме Среднего Поволжья, не менее 30 ц/га. Однако вследствие различий в приходе и использовании ФАР в разные годы РО МВУ и ГРО МВУ могли бы варьировать в пределах 20–65 ц/га при оптимальности всех других условий за такой же период ФАД в те же сроки вегетации. Вероятно, более низкая среднеобластная урожайность могла быть обусловлена культурой земледелия, недостаточным корневым питанием, неравномерностью и недостаточностью прихода осадков в течение периодов ФАД и т. д.

Наибольшие значения РО МВП и МВУ рассчитаны для чрезвычайно благоприятного сценария (с «экстремальными» Q_p), и они несколько завышены: реальный период ФАД, как и «всходы-созревание», был бы короче, то есть меньше суммы Q_f и Q_{Af} .

Занижены и наименьшие значения МВП и МВУ: не учтено, в частности, что при меньшем приходе ФАР период «всходы – цветение, начало молочной спелости» должен быть более длительным, и следовательно, большим приход ФАР.

Остановим внимание на одном интересном, как нам кажется, моменте. Из данных табл. 1 следует, что если бы мы захотели более сжато объединить эти же материалы, то можно было бы объединить результаты для Московской и Курской, Тамбовской и Воронежской, Самарской и Саратовской областей. Некоторым основанием для «объединения» областей в три группы является физико-географическая бли-

зость в пределах группы, особенно по долготе. Иначе говоря, объединение областей по ЗПВ, по МВДУ – это результат сходства в деятельности посевов, обусловленной, по-видимому, климатическими причинами, независимо от того, что Московская и Курская области относятся к исходно разным природно-климатическим (почвенным) зонам. Однако, поскольку ныне вопрос урожайности решается не столько за счет естественного плодородия почвы, сколько за счет вносимых минеральных удобрений, количество которых может быть одинаковым в обеих областях, постольку решающими в продукционном процессе оказываются МК факторы (по Q_p по ЗПВ).

Использование данных о приходе ФАР в агрометеорологических прогнозах урожайности

Вполне очевидно, что снижение прихода ФАР в любой период вегетации яровых культур может отрицательно сказаться на урожайности, что можно учесть, как и можно учесть последствия сниженного прихода ФАР, но при этом заранее прогнозировать время наступления и величину эффекта достаточно сложно. Совершенно по-другому выглядит ситуация, если снижение ФАР будет приходиться на «критические радиационные периоды», значение которых для растений очень велико.

Как известно, впервые указания на существование в онтогенезе «критических периодов» были высказаны основоположником агрометеорологии П.И. Броуновым [2]. В последующем стали известны и хорошо исследованы периоды высокой чувствительности растений к температуре воздуха и влаге в почве [17], но критические радиационные периоды (КРП) были выявлены и обоснованы нами [35, 36, 40] лишь в конце XX – начале XXI века.

В ходе опытов исходно было показано, что затенение растений на 3–5 дней в разные фазы онтогенеза влияет на конечную урожайность неодинаково [34] (рис. 1). Ныне можно говорить о трех таких КРП для яровых злаков.

В первый КРП («всходы – второй лист») на начальном этапе органогенеза снижение I_f на 30–50% (энергетически всего лишь на 1–2% от прихода за период ФАД) в течение физиологической длины дня (особенно в гражданские сумерки) и его радиационного укорочения существенно влияет на конечную урожайность [35, 37], составляющую зачастую 30–50% от максимально возможной. Это влияние осуществляется через дифференциацию и образование тканей зачаточного будущего соцветия, закладку валиков

зачаточных междоузлий, детерминацию проводящих и механических тканей стебля, размеров и массы стебля и листьев, далее – элементов структуры колоса. Поэтому, оценивая текущие данные о сниженном приходе ФАР в этот морфофизиологический период роста, можно с большой заблаговременностью ожидать будущие возможные «потери» (недоборы) урожайности.

Такой эффект, негативный с хозяйственной точки зрения, адаптивен и позитивен для растений, позволяя им, изменяя свою архитектуру, расти в условиях последующего «ожидаемого» снижения прихода ФАР и укорочения фотопериода, иметь для этого меньший фотосинтез и меньшую массу дышащих органов и сохранять тем самым сопряженность основных процессов за сутки, работая с максимальным КПД_А ФАР.

В этот период ростовые процессы осуществляются за счет питания запасами эндосперма зерновок. Фотосинтетический аппарат только начинает формироваться; газообмена по CO_2 еще нет. Лучистая энергия, причем низкой интенсивности, в сумерки, оказывает лишь информационно-регуляторное влияние через пигментные системы фотоморфогенеза, но, тем не менее, это трех-пятидневное кратковременное влияние, как показали наши опыты, чрезвычайно значимо в отношении конечной продуктивности.

Значимость погодных условий в период «всходы-кущение» в отношении конечной урожайности отмечена, например, в Саратовской области [25], что подтверждает концепцию критических периодов в жизни растений.

Второй КРП наступает на этапе V органогенеза – этапе образования и дифференциации качественно новых (генеративных) органов [19] – когда независимо от культуры и сорта формируется максимальное количество зачаточных цветков (100–200 шт.). При снижении I_f на этом этапе усиливается асинхронность развития цветков, усиливается разнокачественность органов соцветия, и поэтому в ходе саморегуляции и адаптации к условиям среды и для выживания вида происходит т. н. «сброс» (отмирание «ненужных»), менее развитых и менее качественно сформированных цветков [38]. Проявление этого качественного и количественного эффекта хорошо заметно уже на этапе VI в начале этапа VII органогенеза. Данный КРП, также кратковременный (3–5 дней), совпадает с началом этапа V в то время, когда происходит полное радиационное смыкание посева, и его плотность достигает 2,0–2,5 м²/м². В то же время максимальное (потенциальное) количество формиру-

Период затенения растений						
Всходы	Кущение	Выход в трубку	Колошение	Цветение	Созревание	Масса зерна, %
						100
						90
						50
						70
						50
						70
						30

Рис. 1. Влияние затенения растений яровой пшеницы в разные периоды онтогенеза на массу зерновок колоса (в % к незатеняемому контролю)

ющихся на этапе V зачаточных цветков отражает не только специфику сорта, но и существенную зависимость от интенсивности ФАР.

Действительно, если в этот КРП приход ФАР может оказаться сниженным и к тому же посев может стать, в зависимости от скорости роста, достаточно плотным, то это будет ослаблять I_f и в самом посеве. Тем самым, зная приход ФАР в этот КРП, можно оценивать степень негативного влияния на формирование колоса, количество и массу зерновок, то есть на конечную урожайность, «снижение» которой может достигнуть 35–45% от возможных значений.

В третий КРП («предцветение», за 2–3 дня до цветения, на этапе VIII органогенеза), совпадающий у пшеницы с выколашиванием, снижение прихода ФАР в сумерки и, тем самым, укорочение воспринимаемого растениями фотопериода [37] может существенно влиять на гормональную регуляцию качества пыльцы, степень фертильности (стерильности) цветков в ходе оплодотворения на IX этапе, на количество и качество будущих зерновок. Учет сниженного прихода ФАР в этот период может позволить заранее, за 20–25 дней до созревания и уборки урожая, оценить величину возможных «потерь» урожайности, которые могут достигать 45–50% от возможной (рис. 1).

Так, если в «норме», при обязательном «сбросе» элементов соцветия (колоса) в ходе его развития из 100% зачаточных цветков сохраняется около 28–30% в виде зерновок (что является оптимальным КПД озерненности, K_z [33, 37]), то при снижении ФАР в КРП «...разрыв между потенциальной продуктивностью сорта и реальной зачастую достигает огромных размеров»: вместо 25–30 зерновок может формироваться 10–15 и менее [19].

Таким образом, учет радиационных условий в периоды особо высокой чувствительности растений к I_f , к длине фотопериода (включающего периоды сумерек) может быть в дальнейшем полезным как при оценке конечной урожайности посевов, так и в агрометеорологических прогнозах возможной продукции.

Заключение

Значимость, оправдываемость прогнозов основывается, действительно, на том, в какой мере агрометеорология, как и столетие назад, во времена К.А. Тимирязева и П.И. Броунова, базируясь на двух «столпах» – на физиологии растений и на метеорологии – получает и использует знания о влиянии метеоклиматических факторов, в том числе радиационного режима, на структурно-функциональную деятельность растений, изучение которой все четче показывает многогранность «состава» и действия факторов среды и все чаще выявляет нелинейность, неаддитивность реакций на них.

Приведенные в работе среднесуточные величины параметров ЭБ посевов – интегральные, приближенные, в известной мере вероятностные: в них не отражена динамика прихода ФАР по декадам, фазам; динамика запасов продуктивной влаги в почве не просто в 1-м слое, а по глубинам (0–20, 0–50, 50–100 см), в которых осуществляется основная деятельность корневых систем. Очевидно также, что для более детальной оценки МВУ и ДВУ необходимы не только точные данные о влагозапасах в 1 м слое почвогрунтов, но и о мало учитываемой вла-

ге неустойчивого завядания растений, тем более с учетом соотношения параметров «радиация-запасы влаги в слоях почвы». По чисто биологическим причинам не может быть точным период каждой из фаз и период ФАД в целом. К тому же имеются методические трудности в определении длительности каждой из фаз фазы состояния растений, которые в известной мере преодолеваются опытом наземных агрометеорологических наблюдений на «контрольных» посевах. Так, к примеру, известно, что между окончанием фазы цветения и оплодотворения (этап IX органогенеза) и наступлением фазы молочной спелости (этап XI) у яровых злаков имеет место период формирования зародыша. Длительность этого периода может достигать 15–20 дней. Очевидно, что для уточнения длительности каждого из периодов со спецификой физиологических процессов в них желательным было бы использовать микроскопическую технику о состоянии и о прохождении этапов органогенеза верхушечного соцветия [19], а также учитывать сопрягаемые с фазами данные о суммах среднесуточных активных и эффективных температур воздуха, а также о суммах температур дня и ночи.

Собственно говоря, среднесуточные значения компонентов ЭБ могут рассматриваться как условный год, в котором МВП и МВУ обусловлены приходом ФАР в период ФАД, а действительная максимальная продуктивность и урожайность – еще и текущими запасами продуктивной влаги в почве.

В данной работе мы не касались вопросов термического режима посевов, приняв исходно его оптимальным. Тем не менее, можно отметить, не приводя здесь соответствующих расчетов, основанных на данных табл. 1, что при реальных ЗПВ часть поглощенной ФАР, не используемой на транспирацию, расходуется на теплообмен со средой [11, 12]. В этом случае у листьев растений в таких областях ЦЧО, как Тамбовская и Воронежская, в течение дня температурный градиент (разность между температурой воздуха и температурой листьев) мог быть равен в среднем примерно $2,1^\circ$ и возрастать к середине дня до $4\text{--}6^\circ$, а в Самарской и Саратовской в околополуденные часы – до $7\text{--}8^\circ$. Естественно, что это внесет дополнительные коррективы характеристики дневного термического режима посевов, влияющего на еще большее снижение T при тех же ЗПВ, на сопряженное с ней снижение интенсивности фотосинтеза, на увеличение «темнового» термозависимого дыхания и, в итоге, на существенное уменьшение продуктивности и урожайности посевов.

Мы не касались здесь вопросов изменения величины ряда компонентов ЭБ, влияющих на количество поглощаемой ФАР (Q_{Af}) при том же ее приходе (Q_f). Так, в частности, Q_{Af} зависит от A_f и в случае поражения поверхности листьев злаков некоторыми фитопатогенами может увеличиваться альбедо листьев и посева в целом и снижаться A_f , а отсюда и Q_{Af} газообмен и величина биомассы. Однако Q_{Af} может снижаться при том же приходе ФАР, если будет поражаться (поедаться) наиболее тонкая часть мезофилла листьев, за счет чего снижаться реальная площадь поглощения ФАР и фотосинтетически активных тканей в тех же листьях.

Тем не менее, анализ таких изменений, особенно с учетом прихода ФАР и возможностей ее использования не только интересен, но и важен для разработки

и применения все более детализированных динамических моделей продукционного процесса, необходимых для успешных АМ прогнозов урожайности сельскохозяйственных культур. Поэтому представленное в статье является, по нашему мнению, одним из первых, новых шагов в перспективном направлении развития радиационной агрометеорологии и решаемых ею научно-прикладных задач.

В данной статье мы ставили задачей дать представление о возможности и необходимости теоретической и экспериментальной разработки (в дополнение к существующим методикам [20]) нового, физиолого-метеорологического, «радиационного» подхода к оценке значимости солнечной радиации в продукционном процессе сельхоз-культур, к учету ее в разрабатываемых прогнозах урожайности.

Список русскоязычной литературы

- Абакумова ГМ, Горбаренко ЕВ, Незваль ЕИ, Шиловцева ОА. Климатические ресурсы солнечной энергии Московского региона. М.: Книжный дом; 2012, с. 312.
- Броунов ПИ. Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1901(1):84.
- Бычкова АП, Казеев ЮИ, Кривонощенко ВИ, Луцько ЛВ, Соколенко СА. Новые приборы для актинометрических наблюдений на сети. Труды ГГО им. АИ Воейкова. 2008;(557):133-146.
- Воейков АИ. Задачи сельскохозяйственной метеорологии. 1957;4:259-67.
- Вильфанд РМ, Страшная АИ. Климат, прогнозы погоды и агрометеорологическое обеспечение сельского хозяйства в условиях изменения климата. В кн.: Адаптация сельского хозяйства России к меняющимся погодно-климатическим условиям. М.: РГАУ-МСХА имени КА Тимирязева; 2011. с. 23-38.
- Гончаров НП, Гончарова ПЛ. Методические основы селекции растений. Новосибирск: Гео; 2009. с. 427.
- Гордеев АВ, Клещенко АД, Черняков БА, Сиротенко ОД. Биоклиматический потенциал России: теория и практика. М.: Тов. научн. изд. КМК; 2006, с. 512.
- Грингоф ИГ, Клещенко АД. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Обнинск: ФБГУ «ВНИИГМИ-МЦД»; 2011(1):808.
- Ефимова НА. Радиационные факторы продуктивности растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат; 1977. с. 215.
- Клешнин АФ, Боковая ММ, Шульгин ИА. Об удельной теплоемкости и связанной воде растений. Доклады Академии наук СССР. 1958;122(5):940-943.
- Клешнин АФ, Строгонов БП, Шульгин ИА. К вопросу об энергетическом балансе листьев растений. Физиология растений. 1955(6):1211-1217.
- Клешнин АФ, Шульгин ИА. О связи между транспирацией и температурой листьев растений в естественных условиях. Докл. Выездной сессии ОБН в г. Казани. Казань: КазГУ; 1960. с. 46-59.
- Клещенко АД, Вирченко ОВ, Савицкая ОВ. Спутниковый мониторинг состояния и продуктивности посевов зерновых культур. Обнинск: ФБГУ «ВНИИСХМ»; 2013. с. 54-70.
- Клещенко АД, Вольвач ВВ, Устинова ОК. Агрометеорологическое обеспечение страхования погодных рисков в сельскохозяйственном производстве: состояние и проблемы. Обнинск: ФГБУ «ВНИИСХМ»; 2013. с. 204-221.
- Клещенко АД, Найдина ТА, Гончарова ТА. Использование данных дистанционного зондирования для моделирования продукционного процесса кукурузы. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012;9(1):259-268.
- Кошкин ЕИ. Физиология устойчивости сельскохозяйственных культур. М.: Дрофа; 2010. с. 638.
- Кузнецов ВВ, Дмитриева ГА. Физиология растений. М.: Высшая школа; 2006. с. 742.
- Кумаков ВА. Физиологическое обоснование моделей сортов пшеницы. М.: Колос; 1985. с. 270.
- Куперман ФМ. Морфофизиология растений. Морфофизиологический анализ этапов органогенеза различных жизненных форм покрытосеменных растений. М.: «Высшая школа»; 1984. с. 240.
- Лебедева ВМ, Страшная АИ. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Оперативное агрометеорологическое прогнозирование. Обнинск: «ВНИИГМИ-МЦД»; 2012. с. 216.
- Любищенко ВН. Фотосинтез и хемосинтез в растительном мире. М.: Сельхозгиз; 1935. с. 320.
- Ничипорович АА. О путях повышения продуктивности фотосинтеза растений в посевах. В кн.: Фотосинтез и вопросы продуктивности растений. М.: АН СССР; 1963. с. 3-38.
- Ничипорович АА, Шульгин ИА. Фотосинтез и использование энергии солнечной радиации. В кн.: Ресурсы биосферы. Л.: Наука. Том 2; 1976. с. 6-55.
- Полонский ВИ. Анализ продукционной деятельности пшеницы при высоких интенсивностях ФАР. Физиология растений. 1980;(4):573-584.
- Полужков РА, Смоляр ЭИ, Терлеев ВВ, Топаж АГ. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. СПб.: Изд. С.-Петербур. Ун-та; 2006. с. 396.
- Росс ЮК. Радиационный режим и архитектура растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат; 1975. с. 342.
- Сиротенко ОД. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктив-

ности агроэкосистем. Л.: Гидрометеиздат; 1981. с. 167.

Страшная АИ. Состояние и проблемы оперативного агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства на федеральном уровне в условиях глобального изменения климата. Труды ВНИИСХМ. 2007;(36):78-91.

Страшная АИ, Максименкова ТА, Чуб ОВ. Оперативное агрометеорологическое обеспечение аграрного сектора экономики России в условиях изменения агроклиматических ресурсов. Обнинск: ФГБУ «ВНИИСХМ»; 2013. с. 21-40.

Тимирязев КА. Солнце, жизнь и хлорофилл. М.: Сельхозгиз; 1948;(1):82-692.

Тооминг ХГ. Солнечная радиация и формирование урожая. Л.: Гидрометеиздат; 1977. с. 200.

Шульгин ИА. Растение и Солнце. Л.: Гидрометеиздат; 1973. с. 252.

Шульгин ИА. Радиационные и физиологические параметры продуктивности агрофитоценозов. М.: Изд-во Моск. ун-та; 2002. с. 57.

Шульгин ИА. Лучистая энергия и энергетический баланс растений. Фитометеорологические и эколого-географические аспекты. М.: Альтекс; 2004. с. 141.

Шульгин ИА. Солнечные лучи в зеленом растении. Физиолого-метеорологические аспекты. М.: Альтекс; 2009. с. 217.

Шульгин ИА, Простокишина ЕП. О новом критическом радиационном периоде в онтоге-

незе злаков и его регуляторной роли в продукционном процессе. В кн.: Растения в условиях глобальных и локальных природно-климатических и антропогенных воздействий. Ин-т биол. Карел. филиала РАН. Петрозаводск; 2015. с. 202-204.

Шульгин ИА, Страшная АИ. Солнечная радиация и агрометеорологическая оценка состояния посевов с.-х. культур и их урожайности. В кн.: Растения в условиях глобальных и локальных природно-климатических и антропогенных воздействий. Ин-т биол. Карельского филиала РАН, Петрозаводск; 2015. с. 310-312.

Шульгин ИА, Тарасова ЛЛ. Физиолого-метеорологические аспекты регуляции продукционного процесса яровых культур солнечной радиацией. Обнинск: ФГБУ «ВНИИСХМ»; 2013. с. 109-132.

Шульгин ИА, Чуб ОВ. Использование физиолого-метеорологического энергобалансового подхода для оценки среднесуточной радиационно- и влагообусловленной урожайности яровых культур в центральных Нечерноземных и Черноземных областях России. В кн.: Физиология растений – теоретическая основа инновационных агро- и фитобиотехнологий. Калининград: Аксиос; 2014;(2). с. 509-511.

Шульгин ИА, Щербина ИП. Использование энергетических ресурсов в ходе продукционного процесса пшеницы. Биол. науки. 1990;(9):71-82.

