

УДК 633.1:631.559

ЭНЕРГОБАЛАНСОВАЯ ОЦЕНКА УРОЖАЙНОСТИ ЯРОВЫХ КУЛЬТУР

И.А. ШУЛЬГИН¹, Р.М. ВИЛЬФАНД², А.И. СТРАШНАЯ², О.В. БЕРЕЗА²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;

² ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации»)

Рассматривается физиолого-метеорологический энергобалансовый подход к оценке прихода солнечной радиации (ФАР) к посевам и ее использования на процессы фотосинтеза, влагопотребления и транспирации, теплообмена со средой, на регуляторно-информационные фотобиологические процессы фотоморфогенеза, позволяющий выявлять максимально возможную продуктивность (МВП) и урожайность (МВУ) яровых злаков в оптимальных условиях роста и необходимое для них количество продуктивной влаги в почве. Отмечается роль критических радиационных периодов (КРП) в онтогенезе растений и возможность их учета в новых методах агрометеорологических прогнозов урожайности.

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

Как известно, одной из актуальных проблем, стоящих перед человечеством, является проблема продовольственных растительных ресурсов. Среди многих видов растений особая роль принадлежит таким культурам, как пшеница, ячмень, кукуруза, рис, соя и др., постоянно и повсеместно используемым в питании людей и значимым в обеспечении продовольственной безопасности каждой из стран.

Решение проблемы количества и качества пищевых продуктов связано как с экстенсификацией с.-х. производства путем расширения площадей под посевы и быстро растущие насаждения, так и с его интенсификацией. В обоих случаях стоит задача получения в короткие сроки максимально возможной биологической и хозяйственно ценной продукции с единицы площади земли. И эта задача может решаться на основе четко обоснованных научных предствлений о возможностях непрерывно повышать продуктивность возделываемых культур.

В этой связи выращивание однолетних яровых культур, особенно зерновых злаков, представляется важным не только с практической, но и с научной стороны, поскольку посевы могут служить хорошим, с методической точки зрения, объектом изучения производственного процесса и возможностей его оптимизации. Они моно-

видовые и при высокой агротехнике быстро растущие, имеют большое количество растений на ед. площади земли, доступных для изучения их структурно-функциональных параметров, обуславливающих формирование урожайности.

В этой проблеме — как и столетие назад, со времен А.И. Воейкова, П.И. Брунова, К.А. Тимирязева [2, 4, 25], — существует задача выявления однолетнего, а также среднесуточного (климатического, за 30 и более лет) «потолка» максимальной возможной биологической продуктивности (МВП) и урожайности (МВУ) культур в оптимальных условиях роста в разных физико-географических регионах [4, 7, 17, 26, 27, 31].

Представления об МВП необходимы, чтобы, во-первых, знать те климатические (МК), при наличии и величине которых может формироваться в данном регионе однолетняя (ежегодная) и климатическая МВП*; они необходимы, во-вторых, для сравнения с МВП реальной, действительной максимально возможной продуктивности (МВДП) с целью выявления и количественной оценки причин, не позволивших получать близкую к максимальной продуктивность.

На основе представлений о динамике формирования посевов с МВП, а также данных о реальном ходе роста, об условиях роста можно прогнозировать состояние растений на последующих фазах роста и возможную величину конечной урожайности.

Сопоставление МВП и МВДП может позволять земледельцу обращаться в органы страхования посевов в случаях «недобора» урожайности относительно запланированных значений из-за непредвиденных экстремальных 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; в-третьих, что особенно важно, от метеоклиматических параметров среды в период роста и развития растений [5, 13, 26, 28].

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

Среди МК режимов, необходимых для жизнедеятельности, к наиболее точным и однозначным для количественной оценки их роли в достижении соответствующей МВП следует отнести используемые растениями: энергию, без которой не осуществляется ни один процесс, и влагу, вне которой не протекает также ни один из процессов.

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 организмов — незаменима, не поддается регуляции человеком и является лимитирующим физиологическую деятельность фактором [25, 27], именно которым определяется «потолок» МВП при оптимальном значении всех других условий.

Как известно, СР, поглощаемая растениями, совершает многообразную работу [10, 14], используя на различные высоко- и низкоэнергетические процессы: фотосинтез, дыхание, поглощение влаги и транспирация, теплообмен со средой, фотоморфогенез и т.д.

Формирование биомассы (М) обусловлено, прежде всего, совокупностью высокоэнергетических процессов фотосинтетической деятельности за счет прихода, поглощения и использования СР в области фотосинтетически активной радиации

(ФАР, 380–710 нм) [17, 18, 26]. Часть поглощенной энергии в ходе газообмена (фотосинтеза и дыхания) запасается в образуемой биомассе, тогда как другая, значительно большая, расходуется на транспирацию, теплообмен и т.д.

Формирование биомассы (М) растений обусловлено также совокупностью многочисленных низкоэнергетических процессов фоторегуляторной и фотоинформационной деятельности, совершаемой СР в области 380–750 нм [14, 28]. К ним относятся фотопериодизмы, фототропизмы, фотоактивация и фотореактивация, индукция «биологических часов», фотоморфогенез в целом и т.д.

Между тем в сельскохозяйственной практике при решении задачи выявления климатически обусловленной МВП в основном анализируются два метеофактора — тепловой и водный режимы воздуха и почвы [16], тогда как основной энергетический фактор в деятельности растений — солнечная радиация — остается недостаточно учитываемым, хотя в учебниках и пособиях, в том числе по агрометеорологии, все больше отмечается ее важное значение [8], основанное на сведениях из физиологии растений [14, 28]. К тому же существуют мнения о том, что, во-первых, СР не является лимитирующим фотосинтез и рост фактором, малоизменчива, а если она и изменяется, то это адекватно проявляется в изменчивости термического режима; во-вторых, приход СР к растениям — фактор, не поддающийся регуляции.

Необоснованность таких позиций заключается, в том, что т.н. «стабильность» прихода СР в том или ином регионе — это не что иное, как возможность отсутствия многолетнего тренда; однако при этом игнорируется реальный изменчивый приход СР в отдельные годы, в период вегетации в данном году. К примеру, в ходе регистрации СР в Метеорологической обсерватории МГУ установлено, что в Московском регионе тренды многолетних значений суммарной СР и ФАР за период 1958–2007 гг. практически отсутствуют [1] при значительной межгодовой и внутригодовой их изменчивости, варьирующей в разные сутки в период фотосинтетически активной деятельности (ФАД) посевов от 15 до 0,9 МДж/м² ФАР.

Не учитывается также, что в какой-то период (месяц, декаду, день) в данном регионе тепловой режим может обуславливаться адвективным фактором, независимо от величины прихода СР. Не всегда учитывается также, что поступление ФАР к растениям посева (насаждениям) определяется не только ее приходом над растениями, но и архитектурой самого фитоценоза [21, 26]. 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 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].

Мало принимается во внимание то обстоятельство, что в отличие от термического режима посевов их радиационный режим намного изменчивее:

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

– в одни и те же часы дня I_r может весьма варьировать за счет 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°С в дневные часы, радиационный режим существенно

различен: к нижним листьям растений в хорошо сформированном посеве приходит около 3–5% ФАР из 100% над посевами.

В данной работе мы, как и ранее, подчеркиваем, что согласно концепции Тимирязева-Броунова о необходимости использования знаний о влиянии МК факторов, в том числе радиационного режима, на структурно-функциональную деятельность растений (чтобы ею управлять), есть основание считать, что МВП и МВУ посевов яровых культур при оптимальной агротехнике и достаточном количестве поглощаемой из почвы влаги определяется приходом ФАР в течение всего периода ФАД растений в данном регионе и в данном году.

В этой связи можно напомнить о том, что К.А. Тимирязев, разработавший еще в конце XIX в. 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. 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...»* [25].

Под пределом производительности земли, т.е. под понятием «МВП», следует понимать, что результат функционирования посева обусловлен двумя факторами: величиной прихода суммарной ФАР (Q_f) за каждые сутки, за период ФАД и ее оптимальным поглощением посевом, которое зависит от оптимальной структуры (архитектуры) растений в посеве и оптимальной плотности посева в целом [17, 21, 26, 30].

Под оптимальной архитектурой и оптико-физиологической плотностью посева понимается определенное пространственное по его глубине размещение листьев на стебле с их азимутальной и наклонной ориентацией [21, 26, 27], позволяющее ему в радиационно сомкнувшемся состоянии поглощать не менее 80% ФАР и пропускать к поверхности земли около 3–5% I_f от солнца. При такой оптико-физиологической плотности посев, как уже отмечено, характеризует непереуплотненный фитоценоз. Посев может 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.

Подчеркивая значимость именно солнечной радиации для получения МВУ (с единицы площади земли), К.А. Тимирязев писал: *«...окончательно непоправимо только расточительное, неумелое пользование главным источником народного богатства — Солнечным светом. Не утилизированный в 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, вырванный 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»* [25]. Следовательно,

предел МВП посева за период ФАД — это прежде всего радиационно обусловленная (РО) МВП, определяемая количеством приходящей и поглощаемой ФАР и, разумеется, эффективностью ее использования [17]. В данном случае радиационный «предел» — это в естественных условиях приход $Q_{\text{г}}$, имеющий место при безоблачной, сухой и чистой атмосфере с $I_{\text{г}}$, обычно не превышающей 400–480 Вт/м² лишь в околополуденные часы и с величиной максимального суточного $Q_{\text{г}}$ в мае-августе 1980–2000 гг. в Московском регионе 15–16 МДж/м² [1]. Выдерживают и используют ли растения такие $I_{\text{г}}$ и являются ли они оптимальными? Обратимся к экспериментальным данным из физиологии растений.

Листья светолюбивых растений (кукуруза, подсолнечник, тростник, хлопчатник и др.) при исследовании газообмена, его световых кривых, ориентированные перпендикулярно к потоку ФАР, могут при такой полуденной $I_{\text{г}}$ 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 приводит в итоге к т.н. «полуденной депрессии фотосинтеза» за счет депрессии транспирации.

В действительности же листья растений, особенно верхних ярусов, имеют, как правило, в разной степени выраженную наклонную ориентацию [19, 21] и чем она больше, тем меньше на одной и той же единице поверхности листа $I_{\text{г}}$, практически почти никогда не достигающая полуденных значений [27].

С разной ориентацией листьев обусловлена тем, что они наиболее эффективно работают при т.н. «интенсивности радиации приспособления» (ИРП) [26], отвечающей, как нами было показано, среднедневной $I_{\text{г}}$ (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) $I_{\text{г}}$.

Среднедневные значения $I_{\text{г}}$ являются тем верхним средним пределом, при котором 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 $I_{\text{г}}$ порядка 1200–1600 Вт/м², что в 10–15 раз выше, чем среднедневная $I_{\text{г}}$ от солнца [24]. Урожайность пшеницы в таких опытах достигала (в расчете на м²) до 200–250 ц/га.

К сожалению, мало знакомые со светофизиологией растений исследователи не учитывали то, что в таком посеве число растений специально отселектированного сорта с особой (почти вертикальной) ориентацией листьев достигало около 2000 на м² (вместо 300–500 в естественных условиях), а площадь листьев превышала 20–25 м² на 1 м² площади «земли» (вместо 4–5 м² на м² в полевом посеве). В таком созданном посеве и такой площади листьев на ее единицу (на см²) приходила в 8–10 раз меньшая интенсивность (80–120 Вт/м²). Таким образом, эти растения работали 16 час. при $I_{\text{г}}$, не превышающих среднедневные от солнца. Естественно, что и эффективность использования ФАР ($\Pi_{\text{г}}$) 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 ИФР им. К.А. Тимирязева АН СССР с константными оптимальными

условиями водно-корневого питания и ФАР (без БИКР > 1100 нм), температуре воздуха 23°C, температуре листьев около 23–25°C показана возможность получения очень высокой урожайности ряда культур за короткие сроки. Например, масса зерна (М_з) яровой пшеницы Сиете Церрос 66 была получена [32] за 60–65 сут. в размере 1,8–2,0 кг/м² (около 200 ц/га) при интенсивности ФАР 120–150 Вт/м² и 24 ч фотопериоде при естественной концентрации СО₂ (0,03%). Эти экспериментальные исследования подтверждали вывод К.А. Тимирязева о том, что именно лучистая энергия солнца определяет верхний радиационный, и тем самым, при оптимальных условиях, — производственный предел.

Сформулированная К.А. Тимирязевым научная позиция, открывавшая программу совместных исследований физиологов и метеорологов, обращала внимание на важные аспекты энергетики растений:

– подчеркивался 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, способным влиять на интенсивность и количество приходящей радиации к фитоэлементам по глубине посева;

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

Исходя из проблем, поставленных К.А. Тимирязевым, их значимости для развития физиологии растений, сельскохозяйственных наук, агрометеорологии, в начале 60-х гг. XX столетия были проведены экспериментальные исследования компонентов энергетического баланса (ЭБ) листа, растения, посева [10, 11, 26], разработки нового физиолого-метеорологического метода — метода составления и оценки ЭБ в целом, позволяющего решать вопросы о региональных климатических и однолетних «потолках» МВП [30, 31].

Исходно было принято положение о том, что ЭБ может количественно связывать воедино физиологические процессы в организме, позволяя судить об оптимальном (максимальном) и реальном использовании растением не только энергии, но и влаги в зависимости от температуры среды [10, 11, 17, 18]. С этих же позиций к проблеме энергетики и продуктивности посевов яровых культур в эти же годы (1953–1975) было привлечено в СССР и за рубежом внимание ученых разных специальностей (физиологов, физиков, метеорологов, математиков и др.), объединяемых Научным советом по фотосинтезу АН СССР, его председателем, зав. лабораторией фотосинтеза Института физиологии растений им. К.А. Тимирязева, чл.-корр. А.А. Ничипоровичем, разрабатывавшим общую теорию фотосинтетической деятельности растений как совокупности сопряженных процессов по эффективному использованию СР на формирование высоких урожаев.

По существу спустя полвека было востребовано как для теории, так и для практики получения высокой урожайности классическое положение, высказанное академиком В.Н. Любименко о том, что «...с биологической точки зрения фото-

синтез 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» [27].

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

В данной работе мы поставили задачу на основе использования энергобалансового подхода оценить для ряда регионов России значения радиационно обусловленных МВП и МВУ, чтобы в последующем разработать для регионов России климатические «потолки» урожайности яровых культур.

В связи с тем, что формирование продуктивности, как результат газообмена, неразрывно связано с влагообменом растений (поглощением воды из почвы и ее использованием в ряде физиологических процессов), одновременно этим же способом, на основе анализа энергетического баланса решали задачу оценить количество продуктивной влаги в почве, необходимой для получения РО МВП.

Методические аспекты исследования

В основе методики энергобалансового анализа МВП лежит использование уравнения прихода, поглощения энергии ФАР и расхода ее на основные физиологические процессы [10].

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

Известно, что они совершаются в основном за счет физиологически активной радиации (ФиАР, 380–750 нм), ее более узкой области (ФАР, 380–710 нм), хотя в ней 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) ЭБ растения или посева за каждые сутки (основную единицу биологического времени) может быть представлено для области ФАР в упрощенном виде следующим образом [10, 27, 31]:

$$[Q \cdot k_f \cdot A_f = Q_{Af}] = [(Q_{Af} \cdot \Pi_{Af}) = Q_p = Q_m] + Q_T + Q_{IR}$$

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

пасенной энергии (Q_M) в сухой биомассе M суточного прироста или в ее конечной величине.

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

Чтобы от Q_{Af} перейти к Q_M и далее к M , необходимо знать величины Π_{Af} .

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

Значение 10%-го 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 посеве, не зависящим от его возраста (до репродуктивной фазы или до окончания ФАД) и видовой принадлежности растений к С-3 или С-4 типам. В посеве продуктивных культур Π_{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%.

В оптимальных 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 [17] или 4–6% по поглощенной ФАР [27]. По отношению к периоду ФАД Π_{Af} может достигать 6–7%.

Q_T — энергия, расходуемая на физиологически необходимый и чрезвычайно полезный процесс — на *транспирацию* T , осуществляемую в листьях на свету, а у многих видов растений — и в темноте (в сопряженных с истинным фотосинтезом единых процессах) в виде *фототранспирации* T_f и «темновой» (т.е. светонезависимой) *термотранспирации* T_d , идущей во всех гетеротрофных органах на свету и в темноте.

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%.

Процесс транспирации, помимо участия в поглощении влаги корнями, в передвижении в ней минеральных веществ позволяет сложнейшему 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 «охлаждённым» до температуры окружающего листья воздуха [27].

По существу $Q_T = K_T \cdot T$, где K_T — энергия (теплота) парообразования, а T — интенсивность транспирации. На T_f и T_d , независимо от механизма превращения в этих процессах жидкой воды в парообразную затрачивается около 2,42 КДж/г при 20–25°C. 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 так же в итоге испаряемой при усыхании органов; и, в-третьих, гигроскопической влагой (около 10–12%), сохраняемой в конечной воздушно-сухой биомассе.

При дефиците подаваемой из корней влаги часть энергии, не используемой на P и T_d , идет на нагрев тканей листьев (Q) 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. 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_r с которых утром, еще в сумерки, начинается физиологический день, и ими же он заканчивается [35].

Способность использовать крайне низкие I_r 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 [26, 27].

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

Перейдем к представлению используемых в работе необходимых данных для расчета РО МВП.

Прежде всего отметим, что все расчеты приведены в качестве примеров для среднесезонной (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; областей Среднего Поволжья — Самарской и Саратовской.

Актинометрические ежесуточные данные о приходе СР были ранее представлены 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.

Отметим, что в отличие от большинства работ, в которых рассматривается радиационный режим в регионах в связи с продуктивностью (Ефимова, Томилинг, Молдау и др.) в которых значения прихода ФАР приводятся ежемесячно или за период возможной вегетации со среднесуточной температурой выше, к примеру, 5° [10, 21, 26], в наших работах расчет сумм Q и Q_f делается исключительно за тот период онтогенеза, в течение которого растения способны использовать энергию на фотосинтетически активную деятельность (ФАД) с формированием новых приростов массы (т.е. на период ФАД), которая протекает практически от всходов (точнее — спустя 3–5 дней позднее) до периода формирования зародыша после цветения и начала молочной спелости зерновок, после которого поглощаемая радиация расходуется на теплообмен растения со средой и на физическое испарение влаги из усыхающих вегетативных органов и созревающих зерновок в колосе.

Значение K_f — доли суммарной ФАР в суммарной СР, равной 0,48 — основано на принятом в литературе значении [1, 26, 27]. Значения коэффициентов поглощения ФАР (A_f) листьями растений, сомкнутыми посевами в целом, и тем более за период ФАД, приняты равными 80% [26, 29–31]. Об этой величине, т.е. оптической плотности посевов, можно также косвенно судить на основе знания характера размещения растений и их количества на единице площади земли, по величине альbedo в области ФАР, на основе расчетных данных по оптическому дистанционному зондированию посевов со спутников (к примеру, такого показателя, как NDVI) [12].

Значение Π_{Af} принято равным 5%, т.е. более низким, не максимально возможным (7–8%), но в то же время отвечающим деятельности реальных высокопродуктивных посевов [18].

На основе принятого нами значения КПД_A и известных из физиологической литературы значений максимальных КПД (Π_f и Π_{Af}) по приходящей (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 [17, 18, 26], можно получать величины суточных приростов биомассы, накопления ее за период ФАД и за всю вегетацию в целом, т.е. величины M .

Принято известное условие, что практически вся поглощенная ФАР, не используемая на создание биомассы, идет полностью на транспирацию Q_T , обеспечивая запасы продуктивной влаги в почве и поэтому не расходуется на теплообмен листьев растений со средой. Отсюда из Q_T можно получить величину минимально необходимой влаги для транспирации, обеспечивающей формирование РО МВП.

Результаты и обсуждение

Результаты расчетов энергетического баланса посевов яровой пшеницы и ячменя представлены в таблице 1. Представим среднеголетние значения радиационно обусловленной МВП в ряде областей России при оптимальности всех других условий, чтобы затем сравнивать с этой «нормой» однолетние значения МВП при других приходах ФАР или же при другом коэффициенте поглощения ФАР посевом. Это позволяет узнать тот «предел» (по К.А. Тимирязеву), на который следует ориентироваться и селекционеру, и земледельцу. 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 он был короче (52 дня), но с большим суточным значением, что связано с климатической спецификой областей по количеству осадков, по облачности, по термическому режиму. Различие в приходе Q и Q_f в этих областях не превышает 10%.

Поскольку приняты одинаковыми для посевов в оптимальных условиях роста величины A_f и КПД_A то, естественно, близки сами значения величины $Q_p = Q_M$, на которые 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 $K_{хоз} = 0,3$) равно 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.

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

Компоненты баланса	Области					
	Москов- ская	Кур- ская	Тамбов- ская	Воронеж- ская	Самар- ская	Саратов- ская
Продолжительность периода ФАД «Всходы-цветение, начало молочной спелости», дни	60	58	58	55	54	52
Приходящая ФАР за период ФАД (Q_f), МДж/м ²	564	557	557	540	562	582
Поглощенная ФАР (Q_{Af}), 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), М, ц/га при КПД _{Аf} = 5%	135	133	133	129	134	139
Максимально возможная урожайность (РО МВУ), М _с , ц/га при $K_{xос} = 0,3$	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

Компоненты баланса	Области					
	Москов- ская	Кур- ская	Тамбов- ская	Воронеж- ская	Самар- ская	Саратов- ская
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
Широта / Долгота, град	55,4 / 37,4	51,4 / 36,1	52,7 / 41,2	51,0 / 40,4	53,1 / 50,1	51,4 / 48,3

Как 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.

Для оценки МВУ необходимо, как уже отмечено, знать $K_{\text{хоз}}$ — долю урожая (т.е. зерна) в М посевах. 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_r «укорачивающая» стель; $K_{\text{хоз}}$ может быть меньше (25–30%) при пониженном приходе ФАР (облачность, загущенность посевов), вызывающем световую «этиоляцию» стебля, его утоньшение, и в итоге — снижение размеров и массы колоса.

Из данных таблицы следует, что если бы мы захотели более сжато представить эти же материалы, то можно было бы объединить как равные, результаты для Московской и Курской, Тамбовской и Воронежской, Самарской и Саратовской областей. Некоторым основанием для «объединения» областей в три группы является их физико-географическая близость в пределах группы, особенно по долготе. Иначе говоря, объединение областей по ЗПВ, по МВДУ — это результат схождения 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 современная почва решает не столько за счет своего естественного плодородия, сколько за счет вносимых минеральных удобрений, количество которых может даваться в равной мере в обеих областях, постольку МК факторы (по Q_r , по ЗПВ) оказываются решающими в производственном процессе.

Как следует из таблицы 1, климатическая РО МВУ яровой пшеницы и ячменя составляет во всех областях около 40 ц/га. С учетом прихода, поглощения и воз-

возможного 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, 20].

По исходно принятым условиям, для получения РО МВП запасы продуктивной почвенной влаги не лимитируют фотосинтез и транспирацию и, согласно уравнению ЭБ, при КПД_а, равном 5%, на Q_T расходуется 92–93% Q_{Af} (около 428 МДж/м²). Этой энергии, которую необходимо расходовать на T , отвечают в Московской, Курской, Тамбовской, Самарской областях около 175–177 мм ЗПВ и несколько меньшие значения в Воронежской (169 мм) и большие в Саратовской области (183 мм). 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 M /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 [13].

Между тем в реальной ситуации с изменчивостью условий 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, как ранее отмечено, лишь на свету, зависит от ФАР (т.е. является фототранспирацией, T_f), функционально и строго пропорционально связана с процессами истинного фотосинтеза [27], газообмена, и поэтому она может при недостатке подаваемой влаги из почвы в листья снижать газообмен P и тем самым — прирост биомассы.

Это снижение T_f (и Q_T), вызываемое физиологической необходимостью не допустить «обезвоживания» листа, разрыва водяного «столба» в сосудах стебля, «разбаланса» 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 фотосинтеза, вызванная депрессией T . Одним из регуляторов этих взаимообусловленных процессов выступает устьичный аппарат: уменьшая T , он одновременно снижает поступление CO_2 в лист, P' и снижает затраты 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 энергобалансовый подход позволяет сопоставить T климатическую ($T_{кл}$) по РО МВП с T действительной ($T_{д}$), а гидро(влаго) обусловленную 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, т.е. 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 климатически необходимой для РО МВП меньше климатические действительные радиационно и влагообусловленные МВП и МВУ. При рассмотренном радиационном режиме и соответствующих ЗПВ дей-

ствительные гидрообусловленные максимально возможные значения урожайности (ГРО МВДУ) равны примерно для Московской и Курской около 39–40 ц/га, для Тамбовской и Воронежской — 29 ц/га, а для Самарской и Саратовской — лишь 28 ц/га. Следовательно, на фоне максимальной ГРО МВУ запасы влаги определили максимальную ГРО ДВУ.

Таким образом, посевы 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 за счет 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.

Итак, приведенные в таблице 1 материалы, как примеры составления и использования энергобалансового подхода к оценке МВП и МВДП с учетом прихода и наличия ФАР, ЗПВ в почве, могут использоваться, во-первых, для оценки «нормы» среднемноголетнего «потолка» потенциальной и реальной урожайности яровых культур; во-вторых — для интегральной оценки однолетних значений этих величин; в-третьих — для оценки причин меньшей, чем возможно, урожайности культур в текущем году [23, 24].

Рассмотрим реальные возможности использования текущих данных о приходе ФАР для оценки конечной урожайности на основе ее прогнозирования. Вполне очевидно, что снижение прихода ФАР в любой период вегетации яровых культур может отрицательно сказаться на урожайности, что можно учесть, исходя из соотношения компонентов ЭБ, как и учесть последствия сниженного прихода ФАР, но при этом заранее прогнозировать время наступления и величину эффекта достаточно сложно. Совершенно по-другому обстоит 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 влаги в почве [14], но критические радиационные периоды (КРП) были выявлены и обоснованы нами [28] лишь в конце XX — начале XXI в. В ходе опытов исходно было показано, что затенение растений на 3–5 дней в разные фазы онтогенеза влияет на конечную урожайность неодинаково [28] (рис. 1). Ныне можно говорить о трех таких КРП для яровых злаков.

В первый КРП («Всходы — второй лист») на первом 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, тем самым его радиационного укорочения влияет на урожайность [29], которая может составлять всего лишь 30–50% от максимально возможной. 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 действие через пигментные системы фотоморфогенеза, но тем не менее это трех-пятидневное кратковременное влияние оказалось (в опытах) чрезвычайно значимым в отношении конечной продуктивности. Это фоторегулятор-

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

ное влияние осуществляется через закладку валиков зачаточных междоузлий, детерминацию проводящих и механических тканей стебля, размеров и массы стебля и листьев, дифференциацию и образование тканей зачаточного будущего соцветия, 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, заранее изменяя свою будущую 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.

Значимость погодных условий в период «Всходы – кущение» в отношении конечной урожайности отмечена (на примере Саратовской области) и в работе Р.Р. Полуэктова с соавторами [25], в которой также подтверждается концепция критических периодов в жизни растений.

Второй КРП наступает на V этапе органогенеза — этапе образования и дифференциации качественно новых (генеративных) органов [15], когда независимо от культуры и сорта формируется максимальное количество зачаточных цветков (100–200 шт.). При снижении I_f на этом этапе усиливается асинхронность заложения и развития цветков, усиливается разнокачественность органов соцветия, и поэтому в ходе саморегуляции и адаптации к условиям среды и для выживания вида происходит т.н. «сброс» (физиологическое и структурное отмирание «ненужных») менее развитых и менее качественно сформированных цветков [28]. Проявление этого качественного и количественного эффекта хорошо заметно уже на VI — начале VII этапах органогенеза. Данный КРП, также кратковременный (3–5 дней), совпадает с началом V этапа 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 формирующихся на V этапе 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_r и в самом посеве. Тем самым, зная приход ФАР в этот КРП, можно оценивать степень негативного влияния на формирование колоса, количество и массу зерновок, т.е. на конечную урожайность, «снижение» которой может достичь 35–45% от возможных значений.

В третий КРП («Предцветение», за 2–3 дня до цветения, на VIII этапе органогенеза), совпадающий у пшениц с выколашиванием, снижение прихода ФАР в сумерки, и тем самым укорочение воспринимаемого растениями фотопериода [29] 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 [28]), 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 [15].

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

Значимость, оправдываемость прогнозов основывается, действительно, на том, в какой мере агрометеорология, как и столетие назад, со времен К.А. Тимирязева и П.И. Броунова, базируясь на двух «столпах»: физиологии растений и метеорологии, — получает и использует знания о влиянии метео-климатических 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 выявляющей нелинейность, неаддитивность реакций на них.

Приведенные в работе среднесезонные величины параметров ЭБ посевов — интегральные, приближенные, в известной мере вероятностные: в них не отражена динамика прихода ФАР по декадам, фазам; как и 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 точные данные не только о влагозапасах в 1 м слое почвогрунтов, но и о малоучитываемой влаге неустойчивого завядания растений при разных физических состояниях почвы, 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 фазофаз состояния растений, которые в известной мере преодолеваются опытом наземных агрометеорологических наблюдений на «контрольных» посевах. Так, известно, что между окончанием фазы цветения и оплодотворения (IX этап

органогенеза) и наступлением фазы молочной спелости (XI этап) у яровых злаков протекает период формирования зародыша. Длительность этого периода может достигать 15–20 дней. Очевидно, что для уточнения длительности каждого из периодов со спецификой в них физиологических процессов желательным было бы использовать микроскопическую технику о состоянии и о прохождении этапов органогенеза верхушечного соцветия [15], а также учитывать сопрягаемые с фазами данные о суммах среднесуточных активных и эффективных температур воздуха, а также о суммах температур дня и ночи.

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 таблицы 1, что при реальных ЗПВ часть поглощенной ФАР, не используемой на транспирацию, расходуется на теплообмен со средой [11]. 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 $4-6^{\circ}$, а в Самарской и Саратовской в околополуденные часы — до $7-8^{\circ}$. Естественно, что это внесет дополнительные коррективы в 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, светонезависимого) дыхания, и в итоге — на существенное уменьшение продуктивности и урожайности посевов.

Мы также не касались вопросов изменения величин 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 альbedo 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 с.-х. культур [5, 16, 20, 22]. 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 работе мы ставили задачу дать представление о возможности и необходимости в дальнейшем теоретической и экспериментальной разработки, в дополнение к существующим методикам [16] нового, физиолого-метеорологического, «радиационного» подхода к оценке значимости солнечной радиации в продукционном процессе с.-х. культур, к учету ее в разрабатываемых прогнозах урожайности, что будет способствовать их дальнейшему совершенствованию.

Библиографический список

1. Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В., Незваль Е.И., Шиловцева О.А. Климатические ресурсы солнечной энергии Московского региона. М.: Книжный дом «ЛИБРИКОМ», 2012. 312 с.
2. Броунов П.И. Труды по сельскохозяйственной метеорологии. Вып. 1. СПб., 1901. 84 с.

3. Бычкова А.П., Казеев Ю.И., Кривонощенко В.И., Луцько Л.В., Соколенко С.А. Новые приборы для актинометрических наблюдений на сети // СПб., Труды ГГО им. А.И. Воейкова, 2008. Вып. 557. С. 133–146.
4. Воейков А.И. Задачи сельскохозяйственной метеорологии. Т. IV. М.: АН СССР, 1957. С. 259–267.
5. Вильфанд Р.М., Страшная А.И. Климат, прогнозы погоды и агрометеорологическое обеспечение сельского хозяйства в условиях изменения климата // В кн.: «Адаптация сельского хозяйства России к меняющимся погодно-климатическим условиям». М.: Изд-во РГАУ-МСХА. 2011. С. 23–38.
6. Гончаров Н.П., Гончарова П.Л. Методические основы селекции растений. Новосибирск: Гео, 2009. 427 с.
7. Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Сиротенко О.Д. Биоклиматический потенциал России: теория и практика М.: Тов. научн. изд. КМК, 2006. 512 с.
8. Грингоф И.Г., Клещенко А.Д. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Т. 1. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2011. 808 с.
9. Ефимова Н.А. Радиационные факторы продуктивности растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 215 с.
10. Клешин А.Ф., Строгонов Б.П., Шульгин И.А. К вопросу об энергетическом балансе листьев растений // Физиология растений. 1955. Вып. 6. С. 1211–1217.
11. Клешин А.Ф., Шульгин И.А. О связи между транспирацией и температурой листьев растений в естественных условиях // Докл. Выездной сессии ОБН в г. Казани. Казань: КазГУ, 1960. С. 46–59.
12. Клещенко А.Д., Вирченко О.В., Савицкая О.В. Спутниковый мониторинг состояния и продуктивности посевов зерновых культур. Обнинск: ФГБУ «ВНИИСХМ», 2013. С. 54–70.
13. Кошкин Е.И. Физиология устойчивости сельскохозяйственных культур. М.: Дрофа, 2010. 638 с.
14. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений. М.: Высшая школа, 2006. 742 с.
15. Куперман Ф.М. Морфофизиология растений. М.: «Высшая школа», 1984. 240 с.
16. Лебедева В.М., Страшная А.И. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Т. 2. Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Кн. 2. Оперативное агрометеорологическое прогнозирование // Обнинск. ВНИИГМИ-МЦД. 2012. 216 с.
17. Ничипорович А.А. Фотосинтез и теория получения высоких урожаев // Тимирязевские чтения. XV. М.: АН ССР, 1956.
18. Ничипорович А.А., Шульгин И.А. Фотосинтез и использование энергии солнечной радиации // В кн.: «Ресурсы биосферы». Т. 2. Л.: Наука, 1976. С. 6–55.
19. Полонский В.И. Анализ продукционной деятельности пшеницы при высоких интенсивностях ФАР // Физиология растений. 1980. Вып. 4. С. 573–584.
20. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. СПб.: Изд. С.- Петерб. ун-та, 2006. 396 с.
21. Росс Ю.К. Радиационный режим и архитектура растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 342 с.
22. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 167 с.
23. Страшная А.И. Состояние и проблемы оперативного агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства на федеральном уровне в условиях глобального изменения климата // Труды ВНИИСХМ. 2007. Вып. 36. С. 78–91.
24. Страшная А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В. Оперативное агрометеорологическое обеспечение аграрного сектора экономики России в условиях изменения агроклиматических ресурсов. Обнинск: ФГБУ «ВНИИСХМ», 2013. С. 21–40.
25. Тимирязев К.А. Солнце, жизнь и хлорофилл. М.: Сельхозгиз. Т. 1, 1948. С. 82–692.
26. Тооминг Х.Г. Солнечная радиация и формирование урожая. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 200 с.

27. Шульгин И.А. Лучистая энергия и энергетический баланс растений. Фитометеорологические и эколого-географические аспекты. М.: Альтекс, 2004. 141 с.
28. Шульгин И.А. Солнечные лучи в зеленом растении. Физиолого-метеорологические аспекты. М.: Альтекс, 2009. 217 с.
29. Шульгин И.А., Страшная А.И. 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». Петрозаводск: Ин-т биол. Карел. филиала РАН, 2015. С. 310–312.
30. Шульгин И.А., Тарасова Л.Л. Физиолого-метеорологические аспекты регуляции продукционного процесса яровых культур солнечной радиацией. Обнинск, ФГБУ «ВНИИСХМ», 2013. С. 109–132.
31. Шульгин И.А., Чуб О.В. Использование физиолого-метеорологического энергобалансового подхода для оценки среднемноголетней радиационно- и влагообусловленной урожайности яровых культур в центральных Нечерноземных и Черноземных областях России // В кн.: «Физиология растений — теоретическая основа инновационных агро- и фитобиотехнологий». Т. 2. Калининград: Аксиос, 2014. С. 509–511.

ENERGY-BALANCE APPROACH TO EVALUATION OF SPRING CROPS YIELD

I.A. SHUL'GIN¹, R.M. VIL'FAND², A.I. STRASHNAYA², O.V. BEREZA²

(¹ Lomonosov Moscow State University, ²Hydrometeorological Centre of Russia)

In the framework of global problem of agriculture intensification the problem of maximum possible productivity (MPP) and maximum possible yield (MPY) of spring crops (wheat, barley, corn and others) is still unsolved for the specific geographical regions. Following the results of K.A. Timiryazev and A.A. Nichiporovich we accepted the hypothesis that the main climate factors limiting the threshold of MPP are the following: the incoming solar radiation, the absorption of photosynthetically active radiation (PAR) by the crop (80–83%) during the period of its photosynthetically activity (PA) and using of PAR in the gas exchange with efficiency larger than 5%.

On the ground of the energy-balance approach the PAR inflow during the period of PA (from the shoots up to the end of flowering) for wheat and barley is calculated for Moscow, Kursk, Tambov, Voronezh, Samara and Saratov areas. It is shown that MPP value may achieve 130–140 centners per hectare, MPY — 38–42 centners per hectare. Under optimal soil humidity conditions, more than 90% of PAR is spent on transpiration (T). It is noted that to obtain the MPP of crop during PA period it is necessary to use for T approximately 180 mm of productive moisture in 1 m of soil. As for wheat and barley the transpiration occurs only in the light (phototranspiration) and depends on the gas-exchange, the decreasing of the content of productive moisture (SPM) in the soil is proportional to the decreasing of transpiration and gas-exchange.

Using the data of SPM during the period of crop PA the maximum possible valid yield, determined by moisture and radiation conditions, is calculated. It achieves 38–40 centners per hectare in Moscow and Kursk areas, 31–33 centners per hectare in Tambov and Voronezh areas, and approximately 28 centners per hectare in Samara and Saratov areas. Noticeably that decreasing of PAR and SPM leads to the decreasing of gas-exchange and weight gain, especially during the critical radiation periods of ontogeny. It is emphasized that the PAR accounting is especially important both for the assessment of current crop conditions and forecast of possible yield.

Key words: solar radiation, spring cereals, energy balance of stands, gas exchange, moisture exchange, maximum possible productivity (MPP), maximum possible yield (MPY), crucial radiation periods, dynamic models of production process.

Шульгин Игорь Александрович — д. б. н., проф. кафедры метеорологии и климатологии МГУ имени М.В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1; тел.: (495) 939-29-42; e-mail: ufarin@yandex.ru).

Вильфанд Роман Менделевич — д. т. н., директор ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (123242, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 11-13; тел. раб.: (499) 252-34-48; e-mail: vilfand@mecom.ru).

Страшная Анна Ильинична — к. г. н., зав. отделом агрометеорологических прогнозов ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (123242, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 11-13; тел.: (499) 252-42-48; e-mail: ais@mecom.ru).

Береза Ольга Викторовна — зав. лабораторий зерновых культур ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (123242, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 11-13; тел.: (499) 252-42-48; e-mail: chub@mecom.ru).

Shul'gin Igor'Aleksandrovich — Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Meteorology and Climatology of Lomonosov Moscow State University, leading researcher of the Hydrometeorological Centre of Russia (119991, Moscow, Leninskie gori 1; tel.: +7 (495) 939-29-42; e-mail: ufarin@yandex.ru).

Vil'fand Roman Mendeleevich — Doctor of Engineering Science, Head of the Hydrometeorological Centre of Russia (123242, Moscow, Bolshoy Predtechenskiy pereulok, 11-13; tel.: +7 (499) 252-34-48, e-mail: vilfand@mecom.ru).

Strashnafya Anna Il'niczna — PhD in Geography, Head of the Department of Agrometeorological Forecast, the Hydrometeorological Centre of Russia (123242, Moscow, Bolshoy Predtechenskiy pereulok, 11-13; tel.: +7 (499) 252-42-48; e-mail: ais@mecom.ru).

Bereza Olga Viktorovna — Head of the Laboratory of Grain Crops, the Hydrometeorological Centre of Russia (123242, Moscow, Bolshoy Predtechenskiy pereulok, 11-13; tel.: +7 (499) 252-42-48; e-mail: chub@mecom.ru).