

ВОЗМОЖНОСТЬ УЧЕТА СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ УРОЖАЙНОСТИ ЯРОВЫХ КУЛЬТУР

И.А. Шульгин^{1,2}, А.И. Страшная¹, О.В. Береза¹

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации*

*²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
ufarin@yandex.ru, ais@mecom.ru*

Одной из актуальных проблем современной агрометеорологии (АМ) – научно-прикладной дисциплины, как и столетие назад, со времен А.И. Воейкова, П.И. Броунова, К.А. Тимирязева [2, 4, 32], является решение задачи выявления климатического (средне-голетнего), а также однолетнего «потолка» максимально возможной биологической продуктивности (МВП) и урожайности (МВУ) посевов возделываемых культур в оптимальных условиях роста в разных физико-географических регионах [23, 30, 33, 42].

Величина МВП¹ 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, 31, 39].

Первые два компонента высокой продуктивности 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.

¹ Далее принимается, что МВУ входит в МВП

Вопрос принципиального характера заключается в том, какие из МК факторов, необходимых для жизнедеятельности растений, можно выбрать для наиболее точной и однозначной количественной оценки их роли в достижении соответствующей МВП. К таким следует отнести факторы, непосредственно используемые растениями: энергию, без которой не осуществляется ни один процесс жизнедеятельности, и влагу, вне которой не протекает также ни один из процессов.

Можно полагать, что влага (запасы продуктивной влаги в почве) как фактор условно менее значима, чем солнечная радиация, так как она 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, следовательно, лимитирующим физиологическую деятельность фактором [32, 35], определяющим «потолок» МВП при оптимальном значении всех других условий.

Как известно, процесс формирования биомассы (М), ее количества, качества, энергоемкости, обусловлен, прежде всего, совокупностью многочисленных высокоэнергетических процессов фотосинтетической деятельности, совершаемой за счет прихода не только приходящей, но и поглощаемой и используемой лучистой энергии солнца [23, 35]. При этом 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.

Процесс формирования биологической продукции, хозяйственно ценных органов растений обусловлен также совокупностью многочисленных (более 100) низкоэнергетических процессов фоторегуляторной и фотоинформационной деятельности, также совершаемой СР в области 380–750 нм [35, 38]. К ним относятся регуляция прорастания семян, биосинтез пигментов, 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 [38].

В соответствии с концепцией Тимирязева – Броунова о необходимости учета влияния солнечной радиации на ход процессов в разные периоды онтогенеза, в настоящее время имеются основания считать, что при оптимальной агротехнике и достаточном увлажнении МВУ определяется уровнем фотосинтетически активной радиации (ФАР), доступной растениям в соответствии с метеорологическими условиями. В связи с этим, межгодовая и внутригодовая оценка этого уровня сможет, по-видимому, в дальнейшем использоваться в долгосрочных и среднесрочных прогнозах состояния посевов с.-х. культур.

Между тем в современной агрометеорологии в большинстве исследований для выявления МВП, для прогноза продуктивности основными оцениваемыми метеофакторами являются два – тепловой и водный режимы воздуха и почвы [24, 26, 28, 29, 31].

Основной же энергетический и регуляторно-информационный фактор в деятельности растений – солнечная радиация – остается практически не учитываемым, хотя в современных изданиях все больше освещается ее важное значение [8], основанное на сведениях из физиологии растений [17]. В разрабатываемых и начинающихся использоваться динамических методах прогноза урожайности СР рассматривается как ежесуточная постоянная величина [15, 29].

В качестве обоснования отсутствия необходимости учета прихода, поглощения и использования СР (физиологически активной радиации, ФиАР, 380–750 нм и фотосинтетически активной радиации (ФАР, 380–710 нм) зачастую принимаются «постулаты» о том, что, во-первых, СР не является лимитирующим фотосинтез и рост фактором, во-вторых, СР мало изменчива; в третьих, если она и изменяется, то это адекватно проявляется в изменчивости термического режима и, в четвертых, приход СР к растениям – фактор, не поддающийся регуляции.

По видимому, некоторая необоснованность таких позиций заключается, во-первых, в том, что принимаемая «стабильность» прихода СР в том или ином регионе – это не что иное, как возможность отсутствия многолетнего тренда; во-вторых, игнорируется реальный изменчивый приход СР в отдельные годы, и в период

вегетации в данном году; в третьих, не учитывается, что в данный год (месяц, декада, день) в данном регионе тепловой режим может обуславливаться адвективным фактором, независимо от прихода СР в этот период; в четвертых, не учитывается, что реальное поступление лучистой энергии к растениям посева (насаждениям) определяется не только приходом ФАР на горизонтальную поверхность, над растениями, но и архитектурой фитоценоза [27, 39]; в пятых, часто ссылаются на то, что существуют трудности измерения СР, отсутствует или трудно доступна измерительная аппаратура и т.д. Так, действительно, лишь на небольшом количестве 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].

Что же касается постоянства «изменчивости» СР, то, к примеру, в ходе ее непрерывной регистрации 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 фотосинтетически активной деятельности (ФАД) посевов от 15 до 0,9 МДж/м² ФАР.

Более того, в разрабатываемых в АМ динамических моделях функционирования посевов, в схеме которых, как правило, приводится радиационный блок, по существу не принимается во внимание то обстоятельство, что в отличие от термического режима радиационный режим посевов 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 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.

Поэтому подчеркнем, что основной процесс, интересующий агрометеорологов – формирование биомассы – осуществляется именно за счет СР, и от ее «потолка», изменчивости ее прихода, поглощения и использования зависит во многом конечная урожайность с.-х. культур [23, 33, 39].

В этой связи следует напомнить о том, что К.А. Тимирязев, разработавший еще в конце XIX века принципиальные подходы к оценке потенциальной продуктивности растений 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 представление о максимальной производительности фитоценозов, включая посевы.

Он пророзливо и точно, словно к сегодняшнему дню, писал: «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 ...» [32].

Под пределом производительности земли, т. е. под понятием «МВП» следует понимать, что конечный результат функционирования посева обусловлен двумя факторами: величиной максимально возможного в данных условиях прихода суммарной ФАР (Q_f) за каждые сутки, за период фотосинтетически активной деятельности (ФАД) и, во-вторых, ее оптимальным поглощением посевом,

которое зависит от количества растений на m^2 , оптимальной структуры (архитектуры) растений в посевах и оптимальной плотности посева в целом [27, 39, 42].

Под оптимальной архитектурой и оптико-физиологической плотностью посева необходимо понимать определенное пространственное по глубине размещение листьев на стебле с их азимутальной и наклонной ориентацией [27], позволяющее ему в радиационно сомкнувшемся состоянии поглощать не менее 80 % ФАР, достигая 83–85 % в период достижения максимального (оптимального для культуры) листового индекса ($LAI \sim 4-5 \text{ м}^2/\text{м}^2$), т. е. в период максимальных суточных приростов биомассы [23]. При такой оптико-физиологической плотности посев, как уже отмечено, должен пропускать к поверхности земли около 3–5 % I_f от солнца, что характеризует не переуплотненный фитоценоз [37, 39].

Такие посева могут работать эффективно при разных I_f в течение дня. Принимается также, что посева не испытывают недостатка (или избытка) ни во влаге, ни в минеральном питании и т. д.

Следовательно, предел МВП посева за период ФАД – это прежде всего радиационно обусловленная (РО) МВП, определяемая количеством приходящей и поглощаемой ФАР [42, 43]. В данном случае радиационный «предел» – это в естественных условиях приход Q_f , имеющий место при безоблачной, сухой и чистой атмосфере с I_f , не превышающей 400–480 Вт/м² лишь в околополуденные часы и с величиной максимального суточного Q_f в мае–августе 1980–2000 гг. в Московском регионе 15–16 МДж/м² [1].

Выдерживают и используют ли растения такие I_f и какие являются наиболее оптимальными? Обратимся к хорошо известным экспериментальным данным из физиологии растений.

Листья наиболее светолюбивых растений (кукуруза, подсолнечник, 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 (T) начинает снижаться, а температура тканей листа повышаться [11, 12], 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 [27], и чем она больше, тем меньше на одной и той же единице поверхности листа I_f , практически почти никогда не достигающей полуденных значений [35, 37].

Поэтому высокая продуктивность растений, имеющих на стеблях разную ориентацию листьев, обусловлена тем, что они наиболее эффективно работают при т. н. «интенсивности радиации приспособления» [33], отвечающей, как нами было показано [37], среднедневной 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 около-полуденное время) I_f .

Можно считать, что среднедневные 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 научно-популярных публикациях говорится о желательности «улучшения» растений, их фотосинтетического аппарата, интенсификации его деятельности. При этом ссылаются не только на «могущество» современной науки, но и на результаты работ ряда ученых (биофизиков и физиологов), проведенных в искусственных условиях при выращивании, к примеру, яровой пшеницы в фитотроне при, казалось бы, экстремальной I_f порядка 1200–1600 Вт/м², что в 10–15 раз выше, чем среднедневная I_f от солнца [25]. Урожайность пшеницы в таких опытах достигала (в расчете на м²) до 200–250 ц/га, т.е. увеличивалась всего лишь

в 4–5 раз по сравнению с таковой у посевов высокопродуктивных культур в оптимальных естественных условиях.

К сожалению, малознакомые со светофизиологией растений исследователи не учитывали то, что в таком посеве число растений специально отобранного сорта с особой (вертикальной) ориентацией листьев достигало около 2000 на м^2 (вместо 300–500 в естественных условиях), а площадь листьев превышала 20–25 м^2 на м^2 площади «земли» (вместо 4–5 м^2 на м^2 в полевом посеве).

В таком искусственно созданном посеве и такой площади листьев на ее единицу (на см^2) приходила в 8–10 раз меньшая интенсивность ФАР (80–120 $\text{Вт}/\text{м}^2$); таким образом, листья таких растений работали 16 часов при I_f , не превышающих среднедневные от солнца. Естественно, что и КПД ФАР (η_f) на формирование биомассы была не выше, чем у продуктивных посевов в естественных условиях [35].

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 °С, температуре листьев около 25 °С реально можно было получать очень высокую урожайность за короткие сроки [37]. Например, масса зерна (M_z) яровой пшеницы Сиете Церрос 66 была получена нами за 60–65 суток в размере 1,8–2,0 $\text{кг}/\text{м}^2$ (около 200 ц/га) при интенсивности ФАР 120–150 $\text{Вт}/\text{м}^2$, получаемой растениями в течение 24 часов при естественной концентрации CO_2 (0,03 %).

Эти экспериментальные современные исследования убедительно подтверждали вывод К.А. Тимирязева, что именно лучистая энергия солнца – ее интенсивность и суточная доза – определяет верхний радиационный и, возможно, при оптимальных условиях продукционный предел.

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

– 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.) способно 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, за счет которых урожайность приближена или не приближена к максимально возможной.

Исходя из отмеченных проблем, поставленных К.А. Тимирязевым, их значимости для последующего развития физиологии растений и агрометеорологии, в России были развернуты экспериментальные исследования компонентов энергетического баланса (ЭБ) листа, растения, посева [11], разработки нового физиолого-метеорологического метода – метода составления и оценки ЭБ в целом, позволяющего решать вопросы о региональных климатических и однолетних «потолках» МВП [42, 44].

Исходно было сформулировано 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. [21, 32, 37]

Итак, рассмотрим 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 в 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 уравнение ЭБ растения или посева за сутки (основную единицу биологического времени) может быть представлено для области ФАР в упрощенном виде [37]:

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

Здесь Q – приход суммарной интегральной СР; k_f – коэффициент перехода от Q к суммарной радиации в области ФАР (Q_f), 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) в соответствии с коэффициентом эффективности ее использования (ЭИ ФАР) или, что то же, с коэффициентом ее полезного действия (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 на *суммарное дыхание (окисление продуктов) R* за сутки, состоящего из *фотодыхания R_f* и «темнового» R_d , т.е. 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 единых процессах) в виде фототранспирации T_f и «темновой» (т. е. светонезависимой) термотранспирации T_d , идущей в наземных гетеротрофных органах на свету и в темноте.

По существу, $Q_T = K_T T$, 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 на внешней стороне клеток 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 используемая на P и T_f , идет на нагрев тканей листьев (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), 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 %, т.е. величина η_{Af} – отношение Q_M к Q_{Af} – достигает 10–12 %.

Значение 10%-го КПД_А 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. В посеве продуктивных культур η_{Af} по M может достигать в период максимальных приростов массы (C_{\max}) 12,5 %. Посев же в целом за период ФАД может работать с η_{Af} порядка 7–8 % [38].

Отметим, что в оптимальных естественных условиях высокопродуктивные культуры работают с η_{Af} ФАР на запасание в конечной биомассе за весь период их вегетации (от всходов до уборки урожая) около 3–4 % по приходящей или 4–5 % по поглощенной ФАР. По отношению к периоду ФАД η_{Af} может достигать 5–6 %, что согласуется с [23].

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 которых утром, еще в сумерки, начинается физиологический день.

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 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 и за сутки как основной единицы биологического времени. [21, 33, 35]

Из уравнения ЭБ (основной модели ЭБ) следует, что для выявления 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_M и саму биомассу M , а отсюда – урожайность.

Информация о ежесуточном приходе ФАР к посевам позволяет тем самым рассчитать (оценить):

- приход Q_f как за весь период вегетации культуры (что обычно и делается [9, 23, 33]), так и, что особенно важно и необходимо, за более короткий период фактического (фотосинтетического) ее использования, то есть за период ФАД [39];

- количество поглощенной ФАР (Q_{Af}) с учетом знания оптических свойств посева (плотности фитоэлементов, характера размещения растений [27], альbedo, в том числе на основе данных спутникового дистанционного зондирования и т.д. [13,15]); известно, что радиационно сомкнувшийся посев может поглощать до 80 % от Q_f ;

- на основе известных из физиологической литературы значений максимальных КПД (η_f и η_{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, получать величины суточных приростов биомассы, накопления ее за период ФАД и за всю вегетацию в целом, т.е. величины M .

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

Прежде всего целесообразно оценить среднемноголетние значения радиационно обусловленной МВП 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 посевам.

Такая возможность оценки среднемноголетней (климатической) МВП и МВУ существует:

– данные о приходе ФАР позволяют на основе анализа ЭБ получать климатические значения радиационно обусловленной (РО) МВП и МВУ культур при оптимальных условиях роста посевов в данном регионе и узнать тот «предел» (по К.А. Тимирязеву), на который следует ориентироваться и селекционеру, и земледельцу;

– данные о приходе ФАР, а также о Q_{Af} , позволяют получить климатические значения минимально необходимых запасов продуктивной влаги (ЗПВ) в почве в течение отдельных периодов и вегетации в целом, расходуемой на процессы, обеспечивающие формирование РО МВП [42, 43];

– при тех же климатических значениях прихода ФАР на основе данных о действительных (реальных) климатических значениях ЗПВ можно получить представление о среднемноголетних (климатических) гидрообусловленных (ГО) максимально возможных действительных величинах продуктивности (МВДП) и урожайности (МВДУ), которые реально всегда ниже радиационно обусловленных величин;

– полученные данные о современной климатической РО МВП, ГО МВП, ГО МВДП могут использоваться не только в агроклиматической оценке современных урожаев, но и в агроклиматических прогнозах продуктивности и урожайности посевов.

Речь может идти, прежде всего, о климатической тенденции изменения прихода осадков и ЗПВ в том или ином физико-географическом регионе при потеплении или похолодании климата, и тогда на основании анализа ЭБ получать представления о динамике водопотребления и использования воды посевами, о динамике продуктивности и урожайности посевов в будущем.

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

– данные об однолетнем приходе Q_f за период ФАД позволяют на основе анализа ЭБ получать для соответствующей культуры значения РО максимально возможной продуктивности и урожайности в тот или иной год в пределах рассматриваемого климатического периода. Это позволяет сопоставить полученные

значения урожайности в данном году с ее климатическими величинами:

– данные о суммах ФАР за период ФАД позволяют получить теоретические метеорологические значения о минимальных величинах ЗПВ, необходимой для получения соответствующей максимальной сухой биомассы.

– на основе данных о реальных суммарных за вегетацию ЗПВ и том же приходе ФАР за ФАД можно получить представление о причинах реально полученной величины продукции, отвечающей ГО максимально возможной действительной ее величине в данном 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 влияющих на дальнейший рост, на величину конечной продуктивности.

– в случае «стабильности» прихода ФАР в течение ФАД, но изменения (снижения) ЗПВ относительно «нормы», можно рассчитать величину «потерь» 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 указать на конкретные причины (условия) недобора урожая и, во-вторых, использовать их при взаимодействии, например, с органами страхования урожая [14].

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 среднесезонной (климатической) энергобалансовой оценки урожая ранней яровой пшеницы и ячменя для Московской области, входящей в группу нечерноземных областей (НО).

Достаточно подробный анализ ЭБ посевов был проведен за период 1981–2001 и 2001–2013 гг. для оценки климатической РО

МВП и МВУ этих культур (таблица). Период ФАД посевов («всходы-цветение, начало молочной спелости») составил в среднем 60 дней.

Таблица

Продолжительность периода фотосинтетической активной деятельности(ФАД) и компоненты энергетического баланса посевов ранней яровой пшеницы и ячменя (среднепогодное значение)

Компоненты баланса	НО	ЧО
Продолжительность периода ФАД «всходы-цветение, начало молочной спелости», дни	60	57
Приходящая ФАР за период ФАД (Q_f), МДж/м ²	564	551
Поглощенная ФАР(Q_{Af}), МДж/м ²	451	441
Используемая ФАР в фотосинтезе (газообмене) и запасаемая в биомассе (Q_M), МДж/м ²	22,6	22,0
Максимально возможная продуктивность (РО МВП), М, ц/га при КПД _{Аг} = 5 %	135	132
Максимально возможная урожайность (РО МВУ), М _з , ц/га при К _{хоз} = 0,3	40,5	39,6
Используемая поглощённая ФАР на транспирацию (Q_T) для РО МВП, МДж/м ²	428	419
Количество продуктивной влаги в 0–100 см на транспирацию (T) для РО МВП, мм	177	173
Количество продуктивной влаги в почве на действительную максимально возможную транспирацию (T) для ВО МВП, мм	172	146
Соотношение между T для РО МВП и T для ВО МВП	0,97	0,84
Максимально возможная влагообусловленная урожайность, ц/га	39	33
Максимально возможная влагообусловленная урожайность (ВО МВП) с учетом дыхания растений после периода ФАД, ц/га	38	32

Приход ФАР (Q_f) был в среднем равен 564 МДж/м², и оптимальный по плотности посев, поглощая 80 %, мог использовать на физиологические процессы около 450 МДж/м².

Для посева η_{Af} ФАР на газообмен и создание биомассы Q_M за период ФАД принят не максимальным (6–7 %), но достаточно большим по поглощенной ФАР (5 %) или, что то же, 4 % по приходящей ФАР, отвечающим, как отмечалось, деятельности высокопродуктивных посевов [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, а среднее значение климатической РО МВУ (при принятой доле урожая, равной 0,3) равно около 40 ц/га.

Аналогичная 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.

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

Для оценки МВУ необходимо, как уже отмечено, знать долю урожая (т.е. зерна) в M посевах. Мы приняли, что масса зерновок в общей массе растений ($K_{хоз}$) составляет в среднем 30 %. Она может быть больше (до 40–42 %) у сортов, высеваемых в более южных регионах, где выше в середине дня I_f , «укорачивающая» стебель; $K_{хоз}$ 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.

Итак, можно принять, что климатическая РО МВУ яровой пшеницы и ячменя составляет в НО 40 ц/га. С учетом прихода ФАР в начале периода молочной спелости, когда колос может вносить свой вклад (2–4 %) в газообмен CO_2 , МВУ достигала бы

42–43 ц/га. Такой уровень урожайности лишь несколько ниже желаемых значений в моделях «идеальных» сортов [6, 18].

В то же время с учетом «затрат» биомассы в ходе дыхания посева (после окончания периода ФАД), максимальные РО МВУ могут составить примерно 41–42 ц/га.

По исходно принятым условиям, для получения РО МВП запасы продуктивной почвенной влаги не лимитируют фотосинтез и транспирацию и, согласно уравнению ЭБ, при η_{Af} , равном 5 %, на Q_T расходуется 92–93 % Q_{Af} (около 428 МДж/м²). Этой энергии, расходуемой на T , отвечает около 180 мм ЗПВ. Отсюда, соотнеся T с величиной M , получим значение транспирационного коэффициента (ТК), равного 130 г воды/г M и продуктивности транспирации (ПТ), составляющей около 7,7 г массы/кг испаряемой воды. Значения ТК очень близки к минимально, а ПТ – к максимально возможным величинам, являющихся, по существу, энергетическими величинами КПД использования поглощенной влаги и полностью согласующихся с экспериментальными данными для посевов яровой пшеницы и ячменя в оптимальных условиях ростах [16].

Между тем в реальной ситуации с изменчивостью условий среды МВДП существенно зависит не только от радиационных параметров ЭБ, но и от Q_T и T , которые не трудно рассчитать. Дело в том, что T осуществляется лишь на свету, зависит от ФАР (т.е. является фототранспирацией, T_f), функционально и строго пропорционально связана с процессами истинного фотосинтеза [37], и поэтому у пшеницы и ячменя 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 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_d), а ГО МВП с ГО ДВП, решающим фактором которой после радиационного режима выступает водный режим растений.

Рассмотрим эту возможность (см. таблицу). Минимально необходимые ЗПВ должны составлять 180 мм, а действительные климатические ЗПВ в 1 м слоя почвы за период ФАД составляли около 172 мм, то есть они были несколько меньше необходимых для получения РО МВП и МВУ. Следовательно, с учетом пропорциональности транспирации величине газообмена на такую же величину отношения меньше климатически действительные влагообусловленные МВП и МВУ. При рассмотренном радиационном режиме и соответствующих ЗПВ действительная гидрорадиационно обусловленная максимально возможная урожайность (ГРО МВУ) равна примерно 39 ц/га; с учетом затрат на дыхание посева после периода ФАД получим в итоге урожайность порядка 38 ц/га, что выше, но весьма близко к достигающей в отдельные годы урожайности (30–32 ц/га) этих же культур во ВНИИСХ НЧО (пос. Немчиновка) [22]. Следовательно, на фоне максимальной ГРО МВУ запасы влаги определили максимальную ГРО ДВУ.

Точно таким же образом был проанализирован ЭБ посевов этих же культур в ЧО в период 1996–2008 и 2001–2013 гг. [42, 44]. Для станции Петринка (Курская область), Мичуринск (Тамбовская область), Каменная Степь (Воронежская область) за период ФАД «всходы-цветение, начало молочной спелости» (в среднем 57 дней) приход ФАР составил 551 МДж/м² и при поглощении посевами 80 % от Q_f на Q_{Af} пришлось 440 МДж/м². В этом случае при η_{Af} , принятом нами равным 5 %, на газообмен и формирование биомассы использовано около 22 МДж/м². При энергоемкости массы

16,8 КДж/г РО МВП составила 132 ц/га и РО МВУ – порядка 33–34 ц/га. Тогда Q_T составила около 420 МДж/м²; для ее использования в ходе T необходимо иметь около 173 мм продуктивной влаги в почве. Между тем в 1 м слоя почвы на фактическое влагопотребление и транспирацию могло расходоваться около 146 мм ЗПВ. Отсюда, на основе соотношения T_0 к максимально возможной $T_{кл}$, равного 0,84, можно уменьшить величину РО МВП и РО МВУ на 15 % и получить расчётное действительно возможное значение ГО МВДУ порядка 33 ц/га; с учетом дополнительных затрат энергии на дыхание после периода ФАД максимальное значение урожайности стало ниже (32 ц/га). В этом случае растения работали с η_{Af} ФАР не 5 %, а около 4–4,5 %, что вполне типично для продуктивных посевов в условиях ЧО России в благоприятные по тепловому режиму годы [23].

Таким образом, посевы яровой пшеницы и ячменя могли бы при нынешних климатических значениях Q_f и ЗПВ иметь урожайность в НО и ЧО не менее 30–33 ц/га. 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.

Для интереса представим еще более высокий, почти потенциальный «потолок» МВП и МВУ, который мог бы реально, с физиологических позиций, достигаться в природной обстановке, если бы приход ФАР в тот или иной год и в тот же период вегетации ранней яровой пшеницы и ячменя был близок к максимальному.

Используем актинометрические данные суточных значений Q_f в ЧО в тот же период ФАД, что и принят нами как среднеголетний (от всходов до окончания ФАД).

В этом случае, приход ФАР мог превышать климатические значения в 1,2 раза; A_f посевов мог быть не 80 %, а 83 %, а значение КПД поглощенной ФАР – не 5 %, а около 6 %. Тогда величина МВП возрастет в 1,5 раза. Если $K_{хоз}$ равен 0,30–0,32, то урожайность могла бы достигать у ранней яровой пшеницы и ячменя почти 60–65 ц/га.

Такие урожаи зерна ярового ячменя и пшеницы реально наблюдались в некоторых регионах в отдельные наиболее благоприятные годы, к тому же при регулярной оптимизации условий роста.

В условиях же сниженного прихода ФАР формируется, как известно, весьма тонкий стебель, с меньшей в сечении площадью механических тканей, что обуславливает меньший по размерам и массе колос; $K_{хоз}$ может быть менее 30 %.

Итак, только за счет различий в приходе и использовании ФАР в разные годы РО МВУ могла бы варьировать в пределах 20–60 ц/га при оптимальности всех других условий за такой же период ФАД, в те же сроки вегетации.

Наибольшие значения РО МВП и МВУ рассчитаны для чрезвычайно благоприятного сценария (с «экстремальными» Q_f) и они несколько завышены: реальный период ФАД, как и «всходы-созревание», был бы короче, т.е. 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.

Рассмотрим реальные возможности использования текущих данных о приходе ФАР для агрометеорологического прогноза урожайности. Вполне очевидно, что снижение прихода ФАР в любой период вегетации яровых культур может отрицательно сказаться на урожайности, что можно учесть, 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 влаге в почве [17], но

критические радиационные периоды (КРП) были выявлены и обоснованы нами [38, 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 [38] (см. рисунок). Ныне можно говорить о трех таких КРП для яровых злаков.

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

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

В первый КРП («всходы – второй лист»), на первом этапе онтогенеза 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 влияет на конечную урожайность [19], 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 наиболее заблаговременно прогнозировать 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 «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 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 чрезвычайно значимо в отношении конечной продуктивности.

Значимость погодных условий в период «всходы-кущение» в отношении конечной урожайности отмечена в [26], в которой подтверждается концепция критических периодов в жизни растений.

Второй КРП наступает на V этапе 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 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 $2,0\text{--}2,5 \text{ м}^2/\text{м}^2$. 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_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, 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 фотопериода [41] 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 (рисунок).

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 [38]), 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 будущем 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 метеоклиматических факторов, в том числе радиационного режима, на структурно-функциональную деятельность растений [5, 8, 30, 41], изучение которой все четче показывает многогранность «состава» и действия факторов среды и все чаще выявляющей нелинейность, неаддитивность реакций на них.

Приведенные в работе среднееголетние 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 влаге 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 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 (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 желательно было бы использовать материалы о прохождении этапов органогенеза верхушечного соцветия [19], получаемые с использованием микроскопической техники, 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, среднееголетние значения компонентов ЭБ могут рассматриваться и как непосредственно одного какого-то

года, в котором МВП и МВУ обусловлены приходом ФАР в период ФАД, а максимально действительная продуктивность и урожайность еще и текущими запасами продуктивной влаги в почве, независимо от равномерного или неравномерного их распределения в связи с выпадающими осадками в течение этого периода.

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, к примеру в таких областях ЧО, как Тамбовская и Воронежская, Самарская и Саратовская, температура листьев в околополуденные часы могла быть выше температуры воздуха на 5–8 °С. 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 дыхания и в итоге на существенное уменьшение продуктивности и урожайности посевов.

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. 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. Так, проведенные исследования уже в ближайшем будущем позволят, по-видимому, поставить задачу районирования территории по величине МВП и МВУ культур на основе учета радиационного фактора.

В данной работе мы не ставили задачей предложить, хоть и предварительно, методику «радиационного» агрометеорологического прогноза конечной урожайности в дополнение к существующим [20], а лишь дать представление о возможности и необходимости теоретической и экспериментальной разработки в

дальнейшем нового, физиолого-метеорологического подхода к оценке значимости солнечной радиации в продукционном процессе с.-х. культур, к учету ее в будущих агрометеорологических прогнозах урожайности, что будет способствовать их дальнейшему совершенствованию.

Список использованных источников

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 // Труды ГГО. – 2008. – Вып. 557. – С. 133–146.
4. *Воейков А.И.* Задачи сельскохозяйственной метеорологии. Том 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 // Адаптация сельского хозяйства России к меняющимся погодно-климатическим условиям. – М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 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. Том 1. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2011. – 808 с.
9. *Ефимова Н.А.* Радиационные факторы продуктивности растительного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 215 с.
10. *Клешин А.Ф., Боковая М.М., Шульгин И.А.* Об удельной теплоемкости и связанной воде растений // Доклады АН СССР. – 1958. – Т. 122, № 5. – С. 940–943.
11. *Клешин А.Ф., Строгонов Б.П., Шульгин И.А.* К вопросу об энергетическом балансе листьев растений // Физиология растений. – 1955. – Вып. 6. – С. 1211–1217.

12. *Клешнин 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.
13. *Клеценко А.Д., Вирченко О.В., Савицкая О.В.* Спутниковый мониторинг состояния и продуктивности посевов зерновых культур. – Обнинск: ВНИИСХМ, 2013. – С. 54–70.
14. *Клеценко А.Д., Вольвач В.В., Устинова О.К.* Агрометеорологическое обеспечение страхования погодных рисков в сельскохозяйственном производстве: состояние и проблемы. – Обнинск: ВНИИСХМ, 2013. – С. 204–221.
15. *Клеценко А.Д., Найдина Т.А., Гончарова Т.А.* Использование данных дистанционного зондирования для моделирования продукционного процесса кукурузы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9, № 1. – С. 259–268.
16. *Кошкин Е.И.* Физиология устойчивости сельскохозяйственных культур. – М.: Дрофа, 2010. – 638 с.
17. *Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А.* Физиология растений. – М.: Высшая школа, 2006. – 742 с.
18. *Кумаков В.А.* Физиологическое обоснование моделей сортов пшеницы. – М.: Колос, 1985. – 270 с.
19. *Куперман Ф.М.* Морфофизиология растений. Морфофизиологический анализ этапов органогенеза различных жизненных форм покрытосеменных растений. – М.: Высшая школа, 1984. – 240 с.
20. *Лебедева В.М., Страшная А.И.* Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том 2. Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Книга 2. Оперативное агрометеорологическое прогнозирование: учебное пособие. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. – 216 с.
21. *Любименко В.Н.* Фотосинтез и хемосинтез в растительном мире. – М.; Л.: Сельхозгиз, 1935. – 320 с.
22. *Неттевич Э.Д.* Организация и результаты работы по созданию высокопродуктивных сортов яровой пшеницы в зоне Московского селекционного центра / Зерновые культуры интенсивного типа нечерноземной зоны РСФСР // Труды СЗНИИСХ. – 1979. – С. 63–67.
23. *Ничипорович А.А.* О путях повышения продуктивности фотосинтеза растений в посевах // Фотосинтез и вопросы продуктивности растений. – М.: АН СССР, 1963. – С. 3–38.
24. *Полевой А.Н., Васалитий Н.В.* Моделирование влияния агрометеорологических условий на формирование агроэкологических категорий урожайности рапса // Труды Гидрометцентра России. – 2013. – Вып. 349. – С. 176–187.

25. *Полонский В.И.* Анализ продукционной деятельности пшеницы при высоких интенсивностях ФАР // Физиология растений. – 1980. – Вып. 4. – С. 573–584.
26. *Полуэктов Р. А., Смоляр Э. И., Терлеев В.В., Топаж А.Г.* Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2006. – 396 с.
27. *Росс Ю.К.* Радиационный режим и архитектура растительного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 342 с.
28. *Сиротенко О.Д.* Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 167 с.
29. *Сиротенко О.Д.* Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том II. Методы расчётов и прогнозов в агрометеорологии. Кн. 1. Математические модели агрометеорологии. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. – 136 с.
30. *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.
31. *Страшная А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В.* Оперативное агрометеорологическое обеспечение аграрного сектора экономики России в условиях изменения агроклиматических ресурсов. – Обнинск: ВНИИСХМ, 2013. – С. 21–40.
32. *Тимирязев К.А.* Солнце, жизнь и хлорофилл. Том 1. – М.: Сельхозгиз, 1948. – С. 82–692.
33. *Тооминг Х.Г.* Солнечная радиация и формирование урожая. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 200 с.
34. *Чуб О.В., Страшная А.И.* О возможности использования нового гидрометеорологического коэффициента увлажнения для мониторинга атмосферно-почвенных засух // Труды Гидрометцентра России. – 2012. – Вып. 347. – С. 190–206.
35. *Шульгин И.А.* Растение и Солнце. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 252 с.
36. *Шульгин И.А.* Радиационные и физиологические параметры продуктивности агрофитоценозов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. – 57 с.
37. *Шульгин И.А.* Лучистая энергия и энергетический баланс растений. Фитометеорологические и эколого-географические аспекты. – М.: Альтекс, 2004. – 141 с.
38. *Шульгин И.А.* Солнечные лучи в зеленом растении. Физиолого-метеорологические аспекты. – М.: Альтекс, 2009. – 217 с.

39. Шульгин И.А. Энергетический баланс и физиологические критерии продуктивности посевов сельскохозяйственных культур в условиях изменения климата // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем // Труды ИГКЭ Росгидромета и РАН. Серия Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2013. – Т. 25. – С. 224–250.

40. Шульгин И.А., Простоквишина Е.П. О новом критическом радиационном периоде в онтогенезе злаков и его регуляторной роли в продукционном процессе // Растения в условиях глобальных и локальных природно-климатических и антропогенных воздействий – Петрозаводск: Ин-т биол. центра РАН, 2015. – С. 602–604.

41. Шульгин И.А., Страшная А.И. Солнечная радиация и агрометеорологическая оценка состояния посевов с.-х. культур и их урожайности // Растения в условиях глобальных и локальных природно-климатических и антропогенных воздействий – Петрозаводск: Ин-т биол. центра РАН, 2015. – С. 604–607.

42. Шульгин И.А., Тарасова Л.Л., Сенников В.А. Агрометеорологические аспекты оценки урожая в условиях климатических изменений // Адаптация сельского хозяйства России к меняющимся погодноклиматическим условиям. – М.: Изд. РГАУ-МСХА, 2011. – С. 90–100.

43. Шульгин И.А., Чуб О.В. Физиолого-метеорологические основы энергетического баланса посевов яровых зерновых культур и его значение для агрометеорологических прогнозов их урожайности // Физиология растений – теоретическая основа инновационных агро- и фитобиотехнологий. Том 2. – Калининград: Аксиос, 2014. – С. 506–508.

44. Шульгин И.А., Чуб О.В. Использование физиолого-метеорологического энергобалансового подхода для оценки среднесезонной радиационно- и влагообусловленной урожайности яровых культур в центральных Нечерноземных и Черноземных областях России // Физиология растений – теоретическая основа инновационных агро- и фитобиотехнологий». Том 2. – Калининград: Аксиос, 2014. – С. 509–511.

45. Шульгин И.А., Щербина И.П. Использование энергетических ресурсов в ходе продукционного процесса пшеницы // Биол. науки. – 1990. – № 9. – С. 71–82.

Поступила в редакцию 10.08.2015 г.