

УДК 551.521+58.03

Л.А. Хворова, В.В. Журавлева,
Л.Н. Плинокосова, А.А. Гриценко

Результаты анализа и компьютерного тестирования блоков радиации и фотосинтеза

Цикл статей, написанных авторами [1, 2], посвящен проблеме разработки комплексной модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур с целью прогноза урожайности и оценки агроклиматических ресурсов Алтайского края и Сибири в целом.

Рост и развитие сельскохозяйственных культур представляет собой процесс усвоения и переработки солнечной энергии, поэтому включение в модель продукционного процесса блоков радиации и фотосинтеза, несомненно, является важным.

Основные задачи моделирования коротковолновой, длинноволновой радиации и фотосинтеза были сформулированы в [1]. Целью же данной работы было проведение исследований по трем направлениям:

- 1) изучение модели коротковолновой и фотосинтетически активной радиации (ФАР) и анализ результатов расчетов;
- 2) исследование и компьютерное тестирование моделей длинноволновой радиации;
- 3) тестирование и сравнительный анализ моделей фотосинтеза.

Модель коротковолновой радиации состоит из трех блоков: «Календарь», «Радиационный блок» и «Блок ФАР».

Календарь – блок, рассчитывающий возможную продолжительность солнечного сияния в зависимости от времени года и географической широты местности. Вычисления производятся по формуле [3]:

$$s_B = 30 \arccos \left(\frac{\sin 5^\circ}{\cos \varphi \cos \delta} - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta \right), \quad (1)$$

где φ – широта местности, δ – склонение Солнца:

$$\delta = -0,408 \cos \left(\frac{2\pi(t_d + 10)}{365} \right), \quad t_d - \text{номер суток, от-}$$

считываемый от 1-го января, s_B – величина действительной продолжительности солнечного сияния в часах.

Радиационный блок состоит из блока, рассчитывающего возможную суммарную радиацию (при безоблачном небе), и блока действительной радиации. Блок суммарной радиации использует данные, полученные в блоке «Календарь». Расчет производится по формуле [4]:

$$Q_o = S_o \int_0^{s_B} \frac{\sin^2 h_\theta}{\sinh \theta + f} dt, \quad (2)$$

где высота Солнца над горизонтом h_θ зависит от географической широты местности φ $\left(-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}\right)$ и угла склонения Солнца δ и вычисляется по формуле:

$$\sinh_\theta = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos(2\pi(t_h + 12)/24), \quad (3)$$

t_h – текущее время внутри суток, выраженное в часах и отсчитываемое от полудня. Интеграл в формуле (3) находится по формуле трапеций.

В блоке действительной радиации производится расчет прямой и рассеянной действительной радиации с использованием данных, полученных по формуле (3), блоку «Календарь», и экспериментальных данных.

При безоблачном небе и при высоте Солнца более 5 градусов над горизонтом прямая солнечная радиация рассчитывается по формуле [3]:

$$S = Q_o e^{\frac{-0,15}{\sinh \theta}}, \quad (4)$$

рассеянная солнечная радиация рассчитывается по формуле [5]:

$$D = Q_o - S. \quad (5)$$

При облачном небе и при высоте Солнца менее 5 градусов над горизонтом рассеянная солнечная радиация рассчитывается по формуле [6]:

$$D = Q_o (1 - k), \quad (6)$$

прямая солнечная радиация рассчитывается по формуле [5]:

$$S = Q_o - D, \quad (7)$$

где k – коэффициент ослабления радиации.

Сумма прямой и рассеянной радиации дает значение суммарной радиации.

Блок ФАР рассчитывает фотосинтетически активную радиацию по формулам:

$$S_\phi = c_s S; \quad D_\phi = c_D D; \quad Q_\phi = c_Q Q = c_Q (S + D) \quad (8)$$

где c_s , c_D , c_Q – коэффициенты перехода от коротковолновой радиации к ФАР [4]:

$$c_s = \frac{\sinh_\theta}{2,09 \sinh_\theta + 0,22}; \quad c_D = 0,6; \quad c_Q = \frac{c_s S + c_D D}{D + S} \quad (9)$$

Модель коротковолновой радиации реализована в виде программы на языке Pascal. Программа

состоит из подпрограмм. В каждой подпрограмме реализован отдельный блок модели. Реализация модели в виде подпрограмм (модулей) позволяет четко отслеживать работу каждого модуля в отдельности, тестировать его независимо от основной программы, а также использовать этот модуль в других программах. Такая реализация позволит производить независимое изменение отдельных модулей, не изменяя структуры самой программы.

Входными параметрами модели коротковолновой радиации являются: широта (φ), номер дня (t_d), коэффициент, зависящий от широты и времени года (f), коэффициент ослабления радиации (k).

Выходными параметрами модели являются: прямая радиация – S , рассеянная радиация – D , суммарная радиация – Q , прямая ФАР – S_ϕ , рассеянная ФАР – D_ϕ , и суммарная ФАР – Q_ϕ .

Расчет производился для трех различных широт. При тестировании модели были получены следующие зависимости:

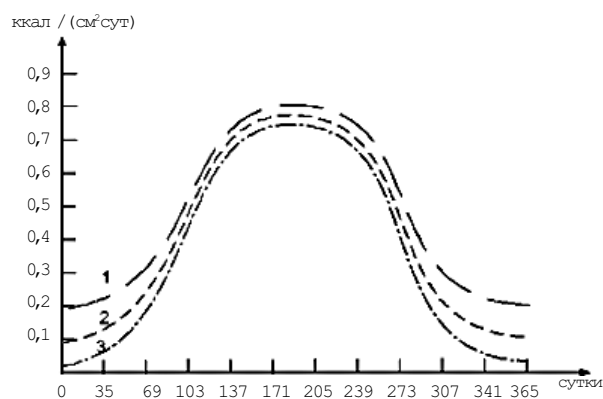


Рис. 1. Суточный приход суммарной радиации в течение года (1- $\varphi = 43^\circ$, 2- $\varphi = 51^\circ 30'$, 3- $\varphi = 66^\circ$)

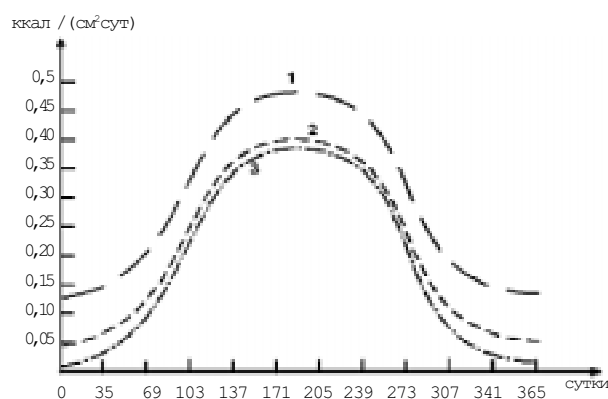


Рис. 2. Суточный приход фотосинтетически активной радиации в течение года при коэффициенте прозрачности атмосферы $k = 0,1$ (1- $\varphi = 43^\circ$, 2- $\varphi = 51^\circ 30'$, 3- $\varphi = 66^\circ$)

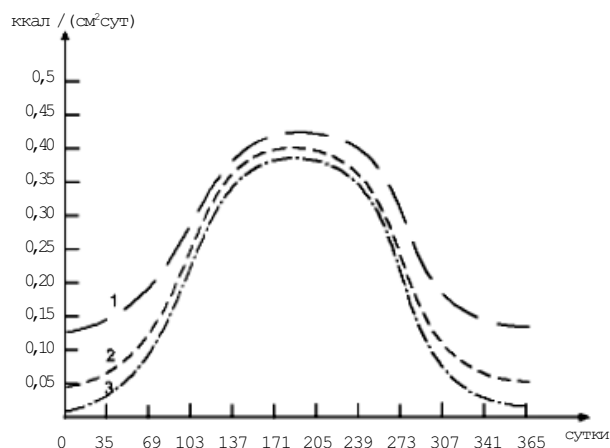


Рис. 3. Суточный приход фотосинтетически активной радиации в течение года при коэффициенте прозрачности атмосферы $k = 0,5$ (1- $\varphi = 43^\circ$, 2- $\varphi = 51^\circ 30'$, 3- $\varphi = 66^\circ$)

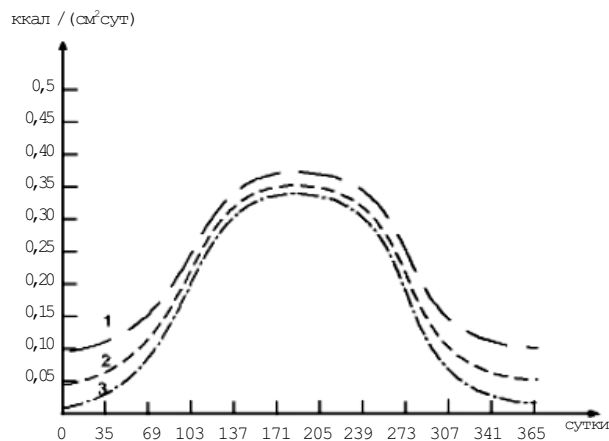


Рис. 4. Суточный приход фотосинтетически активной радиации в течение года при коэффициенте прозрачности атмосферы $k = 0,99$ (1- $\varphi = 43^\circ$, 2- $\varphi = 51^\circ 30'$, 3- $\varphi = 66^\circ$)

Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными [3].

Наибольший интерес вызывает одна из составляющих длинноволновой радиации – эффективное излучение земной поверхности, так как оно оказывает большое влияние на температурный режим земной поверхности, играет существенную роль в образовании заморозков и туманов, при снеготаянии и т.д.

В результате анализа литературы были отобраны те модели, которые более точно описывают эффективное излучение.

Рассматривая эффективное излучение, необходимо оценить влияние на него отдельных факторов, таких как облачность, упругость водяного пара,

температура воздуха и деятельной поверхности почвы.

В результате проведенного исследования было выявлено, что модель Ф. Зауберера (11) более точно отражает зависимость эффективного излучения от облачности [8]. Полученная зависимость приведена на рисунке 5.

$$E = E_0 \frac{-13,8 + \sqrt{566,4 - 0,01 * n^2 - 0,224 * n}}{10} \quad (10)$$

$$E_0 = \sigma T^4 (0,448 - 0,064 \sqrt{e})$$

где E – эффективное излучение; E_0 – эффективное излучение при безоблачном небе; n – степень облачности; e – упругость водяного пара, σ – постоянная Стефана-Больцмана, T – температура воздуха.

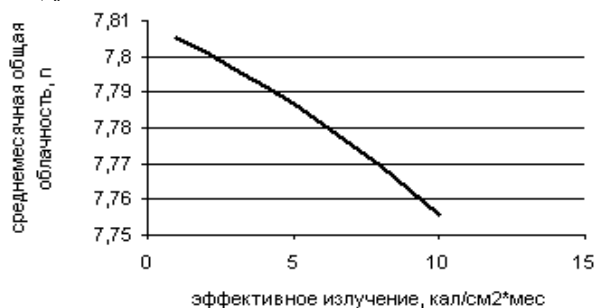


Рис. 5. Зависимость эффективного излучения от среднемесячной облачности

Модель Н.А. Ефимовой [9] наилучшим образом отражает зависимость эффективного излучения от упругости водяного пара (рис. 6):

$$E = E_0(1 - cn),$$

$$E_0 = s\sigma T^4 (11,7 - 0,23e) \quad (11)$$

$$\Delta E = 4s\sigma T^3 (T_n - T),$$

где E – эффективное излучение; E_0 – эффективное излучение при безоблачном небе; n – степень облачности; e – упругость водяного пара, T – температура воздуха; T_n – температура деятельной поверхности почвы, s – коэффициент серости, c – коэффициент, учитывающий влияние облачности на излучение.



Рис. 6. Зависимость эффективного излучения от упругости водяного пара

Анализируя данные о месячных суммах эффективного излучения, полученных как теоретическим путем, так и методом наблюдения, была построена зависимость эффективного излучения от широты местности [9]:

$$E = 21 + 17 * \exp[-0,14(\varphi - 50)] \quad (12)$$

где E – эффективное излучение, φ – широта местности.

Зависимость (рис. 7) отражает распределение эффективного излучения по широтам от 50° до 80° (территория Восточной Сибири).

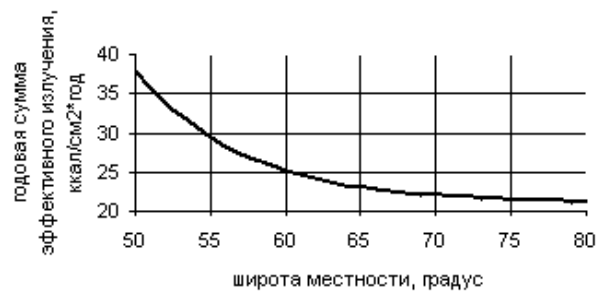


Рис. 7. Зависимость эффективного излучения от широты местности

Наибольшие величины эффективного излучения характерны для континентальных районов данной территории; минимальные суммы – для северных районов Восточной Сибири. Низкие суммы эффективного излучения в высоких широтах обусловлены низкими температурами поверхности почвы в течение всего года, а также большой повторяемостью облачных дней летом.

Завершением данного исследования будет являться синтезированная модель эффективного излучения, которая будет более точно отражать зависимости эффективного излучения от наиболее существенных факторов.

Выходные переменные блоков коротковолновой и длинноволновой радиации являются входными переменными блока фотосинтеза. Фотосинтез – это процесс поглощения энергии солнечных лучей молекулами хлорофилла, преобразование этой энергии в энергию химических связей и ряд биохимических реакций, протекающих в хлоропластах зеленых листьев с использованием этой энергии. Часть образованных при фотосинтезе веществ входит в состав клеток и тканей растения в качестве структурных и запасных веществ, а часть расходуется листьями в процессах дыхания и фотодыхания.

Таким образом, биологическая продуктивность является прежде всего результатом фотосинтетической деятельности растений.

В результате анализа литературы по моделированию фотосинтетической деятельности расте-

ний были отклонены модели простого вида [10, 11], т.е. зависимости интенсивности фотосинтеза от поглощенной ФАР и концентрации углекислого газа в атмосфере. Такие модели не отражают влияния на скорость фотосинтеза температуры воздуха, скорости ветра и водного потенциала почвы, которые зачастую являются лимитирующими факторами. Следовательно, применение простых моделей фотосинтеза даже для описания первого уровня продуктивности может привести к грубым ошибкам. Наиболее подробные (сложные) модели [11, 12] были отклонены из-за недоступности ряда данных.

Поэтому для исследования были выбраны модели средней сложности: модель АФИ [3] и модель Росса-Бихеле-Молдау [13, с. 43 – 46, 76 – 78, 116 – 122]. Эти модели описывают диффузию молекул CO_2 в листе и биохимический цикл Кальвина. Интенсивности фотосинтеза и дыхания в этих моделях зависят от поглощенной листом ФАР, концентрации CO_2 , метеоданных (температуры воздуха, скорости ветра) и параметров, характеризующих сопротивление диффузии молекул CO_2 в листе и цикл Кальвина.

Скорость брутто-фотосинтеза Φ_g в модели АФИ определяется из уравнения [3]:

$$r_{\text{cs}} \Phi_g - (r_x + r_{\text{cs}}) J_g (Q_\phi) + \bar{C}_a + \bar{C}_a J_g (Q_\phi) = 0, \quad (13)$$

где $r_{\text{cs}} = 1,3r_t + 1,6r_{\text{st}} + r_m$; $\bar{C}_a = C_a + r_{\text{cs}} R_d$

$$J_g(Q_\phi) = \left(\frac{1}{\alpha_\phi Q_\phi} + \frac{1}{\Phi_{\text{mm}}} \right)^{-1}; \quad \Phi_{\text{mm}} = Q_\phi \text{FuncStr}(t_A);$$

$$\text{FuncStr}(t_A) = \begin{cases} 0 & \text{при } t_A < 0^\circ\text{C} \text{ и } t_A > 45^\circ\text{C}; \\ 1 - \left(\frac{t_A - 10}{10 - 0} \right)^2 & \text{при } 0^\circ\text{C} \leq t_A \leq 10^\circ\text{C}; \\ 1 & \text{при } 10^\circ\text{C} \leq t_A \leq 35^\circ\text{C}; \\ 1 - \left(\frac{t_A - 35}{35 - 10} \right)^2 & \text{при } 35^\circ\text{C} \leq t_A \leq 45^\circ\text{C}. \end{cases}$$

В модели Росса-Бихеле-Молдау скорость брутто-фотосинтеза Φ_g определяется по формуле [13]:

$$\Phi_g = \left(\frac{1}{\Phi_{\text{mm}}} + \frac{1}{a_\phi Q_\phi} + \frac{r_{\text{cs}}}{C_a} \right)^{-1}, \quad (14)$$

где $\Phi_{\text{mm}}(t_L) = 0,2\Phi_0(6t_\phi - t_\phi^6)$; $r_{\text{cs}} = r_t + r_{\text{st}} + r_m + r_x$;

$$a_\phi = \begin{cases} a_0 & \text{при } t_L < 40^\circ\text{C} \\ a_0 \frac{t_\phi^* - t_L}{12} & \text{при } 40^\circ\text{C} \leq t_L \leq t_\phi^* \end{cases}$$

где Q_ϕ – поглощенная ФАР; a_ϕ – наклон световой кривой; C_a – концентрация CO_2 в атмосфере; r_t – температурное сопротивление прилистного

слоя воздуха; r_{st} – устьичное сопротивление; r_m – сопротивление мезофилла; r_x – сопротивление карбоксилирования; R_d – интенсивность темнового дыхания; t_A – температура атмосферы; t_L – температура листа; t_0 – пороговая температура начала фотосинтеза; t_{opt} – оптимальная температура фотосинтеза; t_ϕ^* – верхняя граница фотосинтеза по температуре; Φ_{mm} – скорость потенциального фотосинтеза; Φ_0 – скорость потенциального фотосинтеза при $t = t_{\text{opt}}$.

В обеих моделях темновое дыхание R_d определяется по формуле:

$$R_d = c^* \Phi_{\text{mf}} \quad (15)$$

где c^* – коэффициент затрат, изменяющийся в пределах 0,1–0,3.

Кроме того, скорость нетто-фотосинтеза Φ_n определяется как разность интенсивностей брутто-фотосинтеза Φ_g и темнового дыхания R_d :

$$\Phi_n = \Phi_g - R_d. \quad (16)$$

Для сопротивления прилистного слоя воздуха в данных моделях использованы следующие зависимости: $r_t = c_1 u^{1/2} + c_2 u^{-1}$ (модель АФИ) и $r_t = c_3 u^{-1/2}$ (модель Росса-Бихеле-Молдау), где u – скорость ветра, c_1, c_2, c_3 – константы.

Влияние водного потенциала почвы на интенсивность фотосинтеза в обеих моделях задается через устьичное сопротивление. Так как использование соответствующих формул требует подключения блока влагопереноса, то в данном исследовании величина устьичного сопротивления бралась постоянной ($r_{\text{st}} = 1$ с/см при открытых устьицах). Такой подход является допустимым при описании роста растений на первом уровне продуктивности, т.е. в условиях постоянного полноценного обеспечения растений питательными веществами и почвенной влагой.

Целью данной работы было исследование вышеприведенных моделей фотосинтеза, их компьютерное тестирование, определение характера влияния метеоданных на скорость фотосинтеза, сравнение результатов исследования моделей и согласованность результатов расчетов с реальными данными.

Для сравнения моделей было проведено исследование зависимости скорости брутто-фотосинтеза (без учета дыхания и фотодыхания) от поглощенной ФАР, температуры воздуха и скорости ветра.

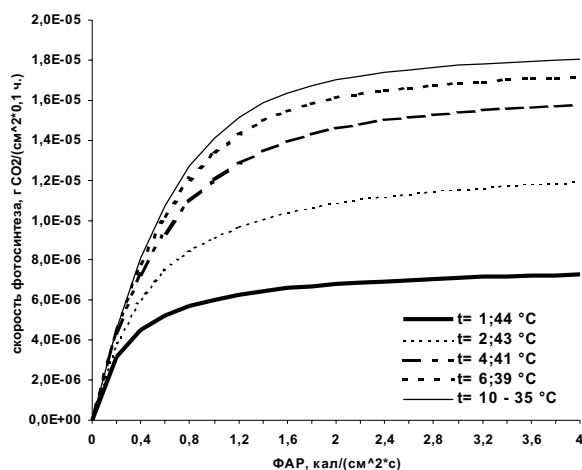


Рис. 8. Зависимость скорости фотосинтеза от ФАР при различных значениях температуры (скорость ветра 4 см/с)

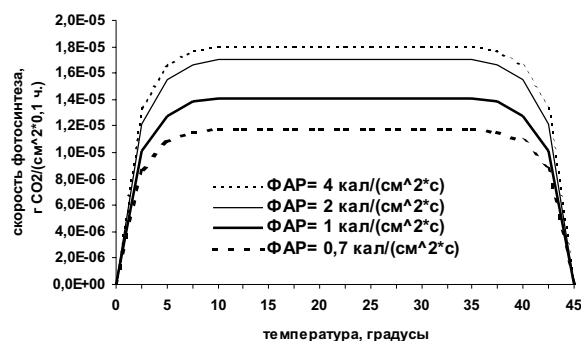


Рис. 9. Зависимость скорости фотосинтеза от температуры при различных значениях ФАР (скорость ветра 4 см/с)

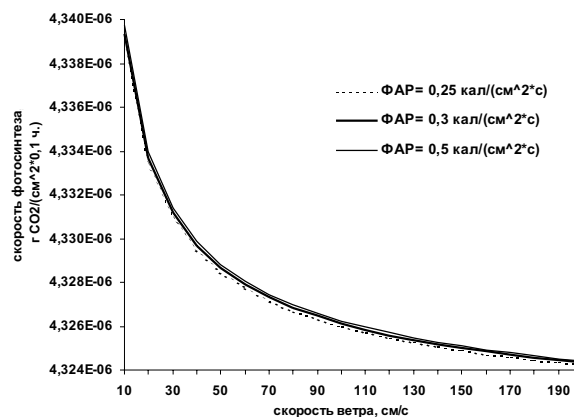


Рис. 10. Зависимость скорости фотосинтеза от скорости ветра при различных значениях ФАР (температура 20 °C)

На графиках (рис. 8, 9, 10) приведены результаты тестирования блока фотосинтеза модели, разработанной в АФИ [6]. Графики отражают характер исследуемых зависимостей и полностью согласуются с расчетными данными по модели Росса-Бихеле-Молдау [13]. Характер полученных зависимостей соответствует данным, приведенным в литературе. При подключении к блоку фотосинтеза блоков радиации, влаго- и теплопереноса будет произведена корректировка структуры модели и уточнены выходные параметры блока фотосинтеза.

Литература

- Хворова Л.А., Гриценко А.А., Рудова Л.Н., Сукачева В.В. Некоторые вопросы моделирования процессов фотосинтеза, энерго- и массообмена в системе почва – растение – атмосфера // Материалы третьей краевой конференции по математике. Барнаул, 2000.
- Гриценко А.А., Рудова Л.Н., Сукачева В.В., Хворова Л.А. Моделирование радиационного режима // Известия АГУ. 1999. №1 (11).
1. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности / Под. ред. К.Я. Кондратьева Л., 1954.
2. Берлянд Т.Г. Радиационный и тепловой баланс Европейской территории СССР // Труды ГГО. 1948. Вып. 10 (72).
3. Росс Ю.К., Тооминг Х.Г. Ослабление прямой и рассеянной радиации внутри посевов сельскохозяйственных культур и описывающие ее полуэмпирические формулы // Актинометрия и оптика атмосферы. Таллин, 1968.
4. Полуэктов Р.А. Динамические модели агроэко-

системы. Л., 1991.

5. Тооминг Х.Г. Солнечная радиация и формирование урожая. Л., 1977.
6. Кондратьев К. Я. Лучистый теплообмен в атмосфере. Л., 1956.
7. Стрелочных Н.Г., Филиппов А.Х. Эффективное излучение на территории Восточной Сибири // Климатология и агрометеорология / Под ред. С.Д. Кашинского, Н.В. Мамонтова, 1973.
8. Пеннинг де Фриз Ф. В. Т., Ван Лаар Х. Х. Моделирование роста и продуктивности сельскохозяйственных культур. Л., 1986.
9. Торнли Дж. Г. М. Математическое моделирование в физиологии растений. Киев, 1982.
10. Лайск А. Х. Кинетика фотосинтеза C_3 -растений. М., 1991.
- Росс Ю.К., Молдау Х.А., Бихеле З.Н. Математическое моделирование транспирации и фотосинтеза растений при недостатке почвенной влаги. Л., 1980.