

**РАЗДЕЛЕНИЕ СУММАРНОГО ИСПАРЕНИЯ НА ТРАНСПИРАЦИЮ И ФИЗИЧЕСКОЕ ИСПАРЕНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАННЫХ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ДВУХУРОВНЕВОЙ ЭНЕРГОБАЛАНСОВОЙ МОДЕЛИ**

**Л. В. Козырева, А. В. Доброхотов, И. Л. Максенкова, А. Е. Ефимов**

*ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»*

*Гражданский проспект, 14, Санкт-Петербург, 195220*

*E-mail: Aludak@gmail.com*

*Поступила в редакцию 01 августа 2016 г., принята к публикации 31 августа 2016 г.*

Транспирация (испарение с растительного покрова) является одним из основных факторов, который наряду с плодородием почвы, количеством удобрений и водным режимом оказывает влияние на продукционный процесс. В настоящей работе проведено тестирование двухуровневой энергобалансовой модели TSEB разделения суммарного испарения на транспирацию и испарение с почвы. Были рассчитаны составляющие энергетического баланса: турбулентный поток тепла над растительностью и почвой, с учетом стратификации приземного слоя атмосферы и аэродинамических характеристик подстилающей поверхности; скрытый поток тепла над почвой с учетом аэродинамического сопротивления почвы, над растительностью по методу Пристли-Тейлора и Пенмана-Монтейса, с учетом устьичного сопротивления. Данные получены на поле кукурузы в Ленинградской области (59°52'57" с. ш., 30°42'28" з. д.) с помощью автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса (АМПАК). Исследования проведены в условиях разреженного (14.07.2016) и сомкнутого (03.04.2016) посевов в фазы развития кукурузы кущение и выметывание, с проективными покрытиями  $f_c = 0,4$ ;  $f_c = 0,8$  и с листовыми индексами LAI = 3,2; LAI = 4,2, соответственно. Показаны результаты расчета транспирации и испарения с почвы с помощью модели TSEB, их величины в разные фазы развития кукурузы, с учетом проективного покрытия и при схожих метеорологических условиях. Проведены расчеты с помощью радиометрических температур растительности и почвы, которые могут быть использованы при сочетании наземных данных и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Разделение суммарного испарения на транспирацию и физическое испарение может быть использовано в агротехнологиях и в задачах экологического мониторинга.

**Ключевые слова:** транспирация, физическое испарение, энергетический баланс, аэродинамическое сопротивление, радиометрическая температура

**SEPARATION OF THE EVAPOTRANSPIRATION INTO TRANSPIRATION AND SOIL EVAPORATION USING GROUND MEASUREMENTS DATA AND TWO-SOURCE ENERGY BALANCE MODEL**

**L. V. Kozyreva, A. V. Dobrohotov, I. L. Maksenkova, A. E. Yefimov**

*Agrophysical Research Institute*

*14, Grazhdanskiy pr., Saint Petersburg, 195220*

*E-mail: Aludak@gmail.com*

Transpiration (evaporation from canopy) is one of the major factors, which along with the soil fertility, the amount of fertilizer and water regime affects the plant production process. The paper presents the results of testing of the two-source energy balance model (TSEB) for separation of evapotranspiration into transpiration and soil evaporation. The energy balance components were calculated. The turbulent heat flux above vegetation and soil was calculated using atmosphere stratification correction and the underlying surface aerodynamic parameters. The latent heat flux above the soil was calculated using the soil aerodynamic resistance, the latent heat flux above the crop canopy was calculated using the Priestley-Taylor and Penman-Monteith equations. The Penman-Monteith equation includes stomatal resistance. The data were obtained for maize crop in the Leningrad region (59°52'57" N, 30°42'28" E) by automated mobile field agrometeorological complex (AMFAC). Measurements were conducted under the partial (14.07.2016) and full (03.08.2016) canopy cover condition in the V6 and VT growth stages of maize with

projective cover  $f_c = 0,4$ ;  $f_c = 0,8$  and leaf area index  $LAI = 3,2$ ;  $LAI = 4,2$ , respectively. The results of transpiration and soil evaporation calculation using TSEB model were shown, as well as the values of the parameters calculated at different canopy growth stages, in similar weather conditions, taking into account the crop projective cover. The calculations were performed using radiometric temperature of vegetation and soil, which can be used with a combination of ground-based and remote sensing (RS) data. Separation of evapotranspiration into transpiration and soil evaporation can be used in the agrotechnology, in the environmental monitoring.

**Keywords:** transpiration, soil evaporation, energy balance, aerodynamic resistance, radiometric temperature.

## ВВЕДЕНИЕ

Суммарное испарение, состоящее из испарения с поверхности почвы и транспирации растений, входит в уравнения водного и теплового баланса подстилающей поверхности. Разделение суммарного испарения на испарение с почвы и транспирацию с растений является важной задачей в агрометеорологии, так как транспирация является основным фактором, влияющим на биомассу и продукционный процесс посевов. Величина суммарного испарения обычно используется для прогнозирования урожайности и водопотребления растений в орошаемом земледелии (Козырева и др., 2013; Якушев и др., 2015). Данное допущение возможно, когда речь идет о поверхностях с сомкнутым растительным покровом. В подобном случае испарение с почвы является незначительным, и оно обычно не принимается во внимание. При разреженных посевах измерение и моделирование транспирации и испарения с почвы является основой эффективного и рационального использования водных ресурсов при глобальных изменениях климата.

Цель данной работы заключалась в тестировании двухуровневой энергобалансовой модели (TSEB) (Colaizzi et al., 2012; Kustas et al., 2007) для разделения суммарного испарения на почвенное испарение и транспирацию посевов кукурузы при помощи данных автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса (АМПАК) (Козырева и др., 2013).

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Растительный покров обладает пространственной и временной неоднородностью. В период развития растений и роста надземной биомассы

происходит увеличение высоты растений и проективного покрытия, т.е. относительной площади проекции растительности на поверхность почвы. В предельном случае растительный покров становится сомкнутым. Пространственная неоднородность поля может определяться проективным покрытием: чем меньшую поверхность занимает растительность на определенном участке поля, тем более важным является учет различий радиационных характеристик растительности и почвы. Двухуровневая энергобалансовая модель (Two-Source Energy Balance (TSEB) первоначально была представлена Норманом с соавторами (Norman, Kustas, 1995). В основе модели лежит идея разделения составляющих энергетического баланса на разряженных посевах сельскохозяйственного поля. Данная модель позволяет вычислять скрытые и явные потоки на растительной поверхности и почве (рис. 1).

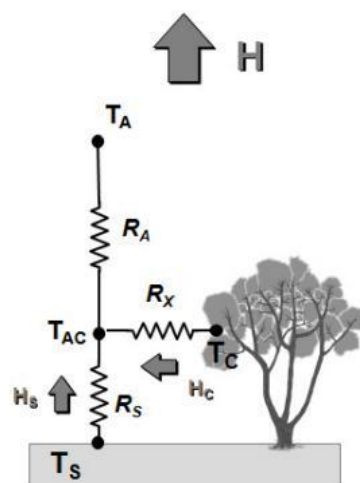


Рис. 1. Схема разделения потоков (Kustas, Anderson, 2007):  $H_c$ ,  $H_s$ ,  $H$  – турбулентный поток тепла над растительностью, почвой и смешанной поверхностью соответственно;  $R_A$  – аэродинамическое сопротивление;  $R_x$  – внутреннее аэродинамическое сопротивление;  $R_s$  – аэродинамическое сопротивление в пограничном почвенном слое;  $T_A$ ,  $T_C$ ,  $T_{AC}$ ,  $T_s$  – температура воздуха, растительности, аэродинамическая температура, температура поверхности почвы соответственно.

Стратегия зарубежных исследований разделения суммарного испарения на транспирацию и испарение с почвы основана на определении составляющих энергетического баланса растительности и почвы с использованием фундаментального закона сохранения солнечной энергии на поверхности сельскохозяйственного поля.

Уравнение энергетического баланса представлено выражением:

$$R_n - \lambda ET - H - G = 0, \quad (1)$$

где  $R_n$  – радиационный баланс ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ );  $\lambda ET$  – скрытый поток тепла ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ );  $H$  – явный поток тепла ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ );  $G$  – поток тепла в почву ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ).

Скрытые потоки тепла с разреженных (почва + растительность) растительной и почвенной поверхностей по отдельности представлены формулами (2) и (3)–(4):

$$\lambda ET = \lambda E_c + \lambda E_s; \quad (2)$$

$$\lambda E_c = R_{nc} - H_c; \quad (3)$$

$$\lambda E_s = R_{ns} - H_s - G. \quad (4)$$

Индексы  $c$ ,  $s$  относятся к растительности и почве соответственно.

При определении транспирации существенной характеристикой сельскохозяйственного поля является проективное покрытие. При сомкнутом растительном покрове ( $f_c = 1$ ) транспирацию можно оценить с помощью уравнения Пенмана-Монтейса. При наличии соответствующего проективного покрытия и солнечной радиации, поглощенной посевам, в исследовании Colaizzi et al. (2012) предложено использовать модернизированную формулу Пенмана-Монтейса:

$$LEc(PM) = f_c \left( \frac{\Delta R_{nc}}{\Delta + \gamma^*} + \frac{\rho C_p (e_s - e_a)}{R_{ah} (\Delta + \gamma^*)} \right), \quad (5)$$

где  $\gamma^* = \gamma(1 + R_c / R_{ah})$  – психрометрическая постоянная с учетом устьичного ( $R_c$ ) и аэродинамического ( $R_{ah}$ ) сопротивления. Расчеты  $R_c$  и  $R_{ah}$  проведены по формулам:

$$R_c = \frac{R_{ah} (e_s - e_a)}{\gamma \left( \left( R_{ah} \frac{R_{nc}}{\rho C_p} \right) - (T_c - T_a) \right)}. \quad (6)$$

Аэродинамическое сопротивление ( $R_{ah}$ ) поверхности почвы и растительности потоку тепла представлены зависимостями (Liu, 2007):

$$R_{ah} = \frac{\left[ \ln \left( \frac{z-d}{z_{om}} \right) - \psi_m \right] \left[ \ln \left( \frac{z-d}{z_{oh}} \right) - \psi_h \right]}{k^2 u}. \quad (7)$$

Универсальная функция для потока количества движения ( $\psi_m$ ) и потока тепла ( $\psi_h$ ) рассчитывается по формулам, предложенным в работе Liu (2007). При неустойчивой стратификации  $L < 0$  ( $L$  – масштаб длины Монина-Обухова):

$$\psi_m(\zeta, \zeta_{om}) = 2 \ln \left( \frac{1+x}{1+x_0} \right) + \left( \frac{1+x^2}{1+x_0^2} \right) - 2 \tan^{-1} x + 2 \tan^{-1} x_0.$$

$$\psi_h(\zeta, \zeta_{oh}) = 2 \ln \left( \frac{1+y}{1+y_0} \right) \quad (8)$$

$$x = (1 - 16\zeta)^{0,25} \quad y = (1 - 16\zeta)^{0,5}$$

$$x_0 = (1 - 16 \frac{\zeta_{om}}{L})^{0,25} \quad y_0 = (1 - 16 \frac{\zeta_{oh}}{L})^{0,5}$$

При устойчивой стратификации  $L > 0$ :

$$\psi_m(\zeta, \zeta_{om}) = -5(\zeta - \zeta_{om});$$

$$\psi_h(\zeta, \zeta_{oh}) = -5(\zeta - \zeta_{oh}).$$

В условиях нейтральной стратификации  $L > 100$ :

$$\psi_m = 0, \quad \psi_h = 0.$$

$$(\zeta = z - d/L; \zeta_{om} = z_{om}/L; \zeta_{oh} = z_{oh}/L).$$

В исследовании Agam, Kustas (2010) транспирацию при оптимальных почвенных условиях предложено рассчитывать по формуле Пристли-Тейлора (9) с коэффициентом  $\alpha_{PT} = 1,26$  при заданных внешних условиях:

$$\lambda E_c(PM) = R_{nc} \alpha_{PT} f_c \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}, \quad (9)$$

где  $R_{nc}$  – радиационный баланс над растительностью ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ );  $\alpha_{PT}$  – коэффициент Пристли-Тейлора;  $\Delta$  – градиент кривой давления насыщения [ $\text{кПа}/\text{К}$ ];  $\gamma$  – психрометрическая постоянная [ $\text{кПа}/\text{К}$ ];  $f_c$  – проективное покрытие. При стрессовых условиях коэффициент Пристли-Тейлора корректируется.

В работе Kustas et al. (1999) радиационный баланс над растительностью

( $R_{nc}$ ) и почвой ( $R_{ns}$ ) предложено рассчитывать через радиационный баланс ( $R_n$ ) смешанной (растительной и почвенной) поверхности и индекс листовой поверхности (Leaf Index Area (LAI)) по формулам:

$$R_{n_s} = R_n \exp\left(-\frac{kLAI}{\sqrt{2\cos(\theta_s)}}\right). \quad (10)$$

$$R_{n_c} = R_n \left[1 - \exp\left(-\frac{kLAI}{\sqrt{2\cos(\theta_s)}}\right)\right]. \quad (11)$$

где  $k = 0,45$  (Андерсон и др., 1997);  $\theta_s$  – зенитный угол солнца.

Косинус зенитного угла солнца ( $\theta_s$ ) рассчитан через широту ( $\varphi$ ), солнечное склонение ( $\delta$ ) и угол солнечного времени ( $w$ ) по формуле (Ситдикова, Русин, 2012):

$$\cos(\theta_s) = \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(w). \quad (12)$$

Поток тепла в почву может быть рассчитан по эмпирической зависимости от радиационного баланса и проективного покрытия (Su, 2000):

$$G = R_n \cdot [G_c + (1 - f_c)(G_s - G_c)], \quad (13)$$

где  $G_c$  и  $G_s$  – эмпирические коэффициенты ( $G_s = 0,315$ ;  $G_c = 0,05$ ).

При расчете турбулентных тепловых потоков используется аэродинамический подход (рис. 1) (Norman et al., 1995). Явный поток тепла ( $H_c$ ) над растительной поверхностью определяется в слое приземного воздуха по вертикали от подстилающей поверхности:  $Z = d + z_{om}$  до  $Z = h_c$ , где  $h_c$  – высота посевов;  $d$  – толщина слоя вытеснения;  $z_{om}$  – параметр длины шероховатости количества движения. Формула расчета турбулентного потока тепла с деятельной растительной поверхности представлена в виде:

$$H_c = \rho C_p \frac{T_{ac} - T_c}{R_x}, \quad (14)$$

где  $T_{ac} = T_0$  – термодинамическая аэродинамическая температура [ $^{\circ}\text{C}$ ] на высоте  $Z = d + z_{om}$ ;  $T_c$  – радиометрическая температура растительной поверхности [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $\rho$  – плотность воздуха [ $\text{г м}^{-3}$ ];  $R_x$  – аэродинамическое (внутреннее) сопротивление [ $\text{с м}^{-1}$ ];  $C_p$  – удельная теплоемкость воздуха [ $\text{Дж (кг К)}^{-1}$ ].

Турбулентный поток тепла ( $H_s$ ) в слое от почвы до координаты  $Z = d + z_{om}$  представлен зависимостью:

$$H_s = \rho C_p \frac{T_{ac} - T_s}{R_s}, \quad (15)$$

где  $T_s$  – радиометрическая температура почвенной поверхности [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $R_s$  – аэродинамическое сопротивление потоку тепла в пограничном почвенном слое [ $\text{с м}^{-1}$ ].

Внутреннее сопротивление ( $R_x$ ) зависит от архитектоники растительного покрова, взаимодействия внутри посева потоков количества движения и тепла, климатических условий и рассчитывается по формуле (Liu, 2007):

$$R_x = \ln\left(\frac{z_{om}}{z_{oh}}\right) \frac{1}{ku_*}, \quad (16)$$

где  $u_*$  – динамическая скорость ветрового потока в приземном слое воздуха. С учетом стратификации, она описывается выражением:

$$u_* = \frac{u_k}{\ln\left(\frac{z-d}{z_{om}}\right) - \psi_m\left(\frac{z-d}{L}\right)}. \quad (17)$$

В данной статье используется метод, в котором учитываются аэродинамическое сопротивление воздуха ( $R_{ah}$ ) и аэродинамическое сопротивление ( $R_s$ ) потоку тепла в пограничном почвенном слое (внутреннее аэродинамическое сопротивление растительности ( $R_x$ ) не учитывается). Такое допущение принимается при малом градиенте температур в слое над растительностью (Norman et al., 1995; Kustas et al., 1999). В этом случае явный поток тепла над растительностью и над почвой определяется по формулам (рис. 1):

$$H_c = \rho C_p \frac{T_c - T_a}{R_{ah}}, \quad (18)$$

$$H_s = \rho C_p \frac{T_s - T_a}{R_{ah} + R_s}. \quad (19)$$

Суммарный явный поток тепла над разряженной растительностью ( $H$ ) будет равен:

$$H = H_c + H_s = \rho C_p \frac{T_0 - T_a}{R_{ah}}, \quad (20)$$

где  $T_a$  – температура воздуха [°C] на высоте  $Z = 2$  м;  $R_{ah}$  – аэродинамическое сопротивление потоку тепла [с м<sup>-1</sup>]. Эффективная температура ( $Tr(\theta_s)$ ) (температура смешанной поверхности) рассчитывается через проективное покрытие ( $f_c$ ), температуру растительности ( $T_c$ ) и температуру почвы ( $T_s$ ) по формуле:

$$Tr(\theta_s) = (f_c(\theta_s)T_c^4 + (1 - f_c(\theta_s))T_s^4)^{1/4} \quad (21)$$

В настоящей работе при расчетах принято допущение  $T_0 = Tr(\theta_s)$ , и аэродинамическое сопротивление потоку тепла определяется по формуле (20). В исследовании Sánchez, Kustas (2008) аэродинамическое сопротивление потоку тепла ( $R_s$ ) в пограничном почвенном слое рассчитывается по формуле:

$$R_s = \frac{1}{0,0025(T_s - T_c)^{1/3} + 0,012u_s}, \quad (22)$$

где  $u_s$  – скорость ветра над почвой на высоте (в пределах от 0,05 до 0,2 м), при которой шероховатостью поверхности можно пренебречь. Скорость ( $u_s$ ) определяется по формуле (Sauer, Norman, 1995):

$$u_s = U_c * \exp(-a(1 - 0,05/hc)), \quad (23)$$

$$U_c = u \left( \frac{\ln\left(\frac{h_c - d}{z_{0m}}\right)}{\ln\left(\frac{z_u - d}{z_{0m}}\right) - \psi_m} \right), \quad (24)$$

где  $U_c$  – скорость ветра над растительностью (м с<sup>-1</sup>);  $hc$  – высота растения (м);  $a$  – параметр, который рассчитывается через листовой индекс, высоту растения и ширину листьев.

В случаях сомкнутого растительного покрова, когда температура растительности ( $T_c$ ) превышает температуру поверхности почвы ( $T_s$ ), для того чтобы избежать отрицательных значений  $R_s$ , используется упрощенная формула (Kustas, 1999):

$$R_s = \frac{1}{a' + 0,012u_s}, \quad (25)$$

где  $a' = 0,004$  м с<sup>-1</sup>.

На рис. 2 представлена блок-схема проведенных расчетов разделения составляющих энергетического баланса над посевами кукурузы и почвой.

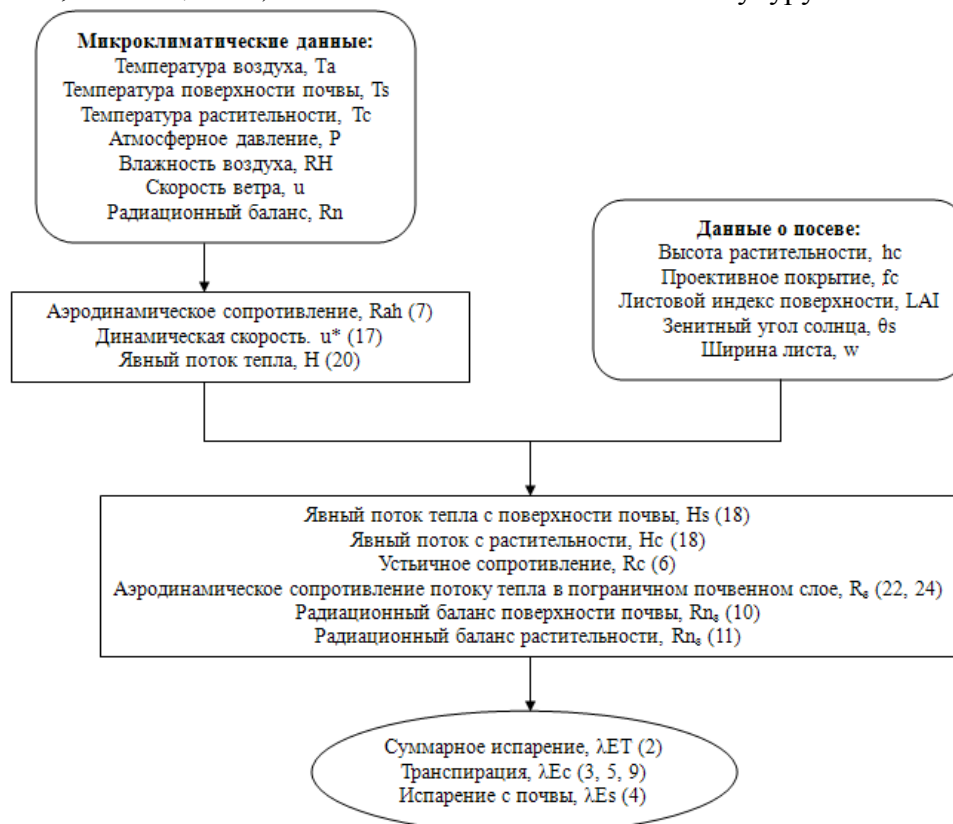


Рис. 2. Блок-схема проведенных расчетов разделения составляющих энергетического баланса над посевами кукурузы и почвой (нумерация в скобках соответствует формулам в статье)

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полевые эксперименты проводились на посевах кукурузы в ОАО «Приневский» 14 июля и 3 августа 2016 г. В табл. 1 приведены основные параметры полевых опытов. С помощью автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса (АМПАК) (Козырева и др., 2016) в экспериментах синхронно измерены: температура излучения растительной и почвенной поверхности – датчиком Comrast СТ (фирма «Optris», Германия); радиационный баланс – балансомером АФИ;

объемная влажность почвы на глубине 10 см – датчиком Decagon Devices 10HS; температура воздуха – датчиком Honeywell HEL-705-U-1-12-C2; относительная влажность воздуха – датчиком Honeywell HIH-462-C (США); атмосферное давление – датчиком Honeywell MPX 4115 AP (США), скорость ветра – прибором H1M Windgeschwindigkeitssensor (Германия). Фотографии проективного покрытия (смоделированные изображения и участки смешанных поверхностей) представлены на рис. 3–4.

Таблица 1. Параметры экспериментов.

Геогр. коорд., высота над уровнем моря	Культура (сорт)	Дата посадки	День со дня посадки, стадия развития	Проективное покрытие	Высота растения (м)	Индекс листовой поверхности ( $\text{м}^{-2} \text{м}^{-2}$ )
ОАО «Приневский» 59°52'57" с. ш., 30°42'28" з. д.; 35 м	Кукуруза, с. «Алмаз», «Каскад»	20 мая 2016 г.	55, кущение	0,4	1,0	3,4
			85, выметывание	0,8	1,9	4,2

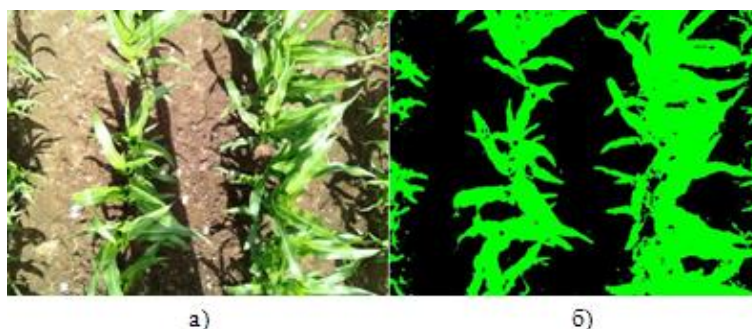


Рис. 3. Фотографии: а) участок поля со смешанной поверхностью; б) смоделированное изображение участка поля (14.07.2016 г.,  $fc = 0,4$ ).



Рис. 4. Фотографии: а) участок поля со смешанной поверхностью; б) смоделированное изображение участка поля (03.08.2016 г.,  $fc = 0,8$ ).

Микрометеорологические параметры, кукурузы (14.07.2016 г.  $f_c = 0,4$ ; 03.08.2016 г. измеренные при помощи АМПАК на посевах  $f_c = 0,8$ ), приведены в табл. 2 и 3.

**Таблица 2. Метеорологические данные по полю кукурузы (14.07.16 г.).**  
**Температура воздуха (Ta), влажность воздуха (RH) и атмосферное давление (P)**  
**измерялись на высоте 2,3 м; температура растительности (Tc) и радиационный баланс**  
**(Rn) – на высоте 1,15 м, скорость ветра (u) – на высоте 2,4 м.**

Величина Время	Ta (°C)	Tc (°C)	Ts (°C)	Tr(θs) (°C)	u (м с <sup>-1</sup> )	Rn (Вт м <sup>-2</sup> )	P (мм.рт.ст.)	RH (%)
11:30	19,2	19,7	20,0	19,9	3,2	353,6	762,6	65,4
11:50	19,8	21,3	21,8	21,6	3,4	559,2	762,5	61,9
12:10	20,1	21,7	23,5	22,8	3,3	563,8	762,5	60,7
12:30	19,5	19,8	21,8	21,0	2,6	272,9	762,5	62,0
12:50	19,3	19,3	21,1	20,4	2,4	240,6	762,6	62,6
13:10	20,0	20,9	23,4	22,4	2,4	420,9	762,6	61,6
13:30	20,4	21,4	23,5	22,7	3,2	436,2	762,7	58,8
13:50	20,6	21,2	22,9	22,2	2,9	419,5	762,7	58,7
14:30	21,4	23,0	22,6	22,8	2,7	574,4	762,7	57,6
14:50	20,9	21,5	21,3	21,4	2,5	323,8	762,7	58,2
M	19,2	20	21,1	20,6	3,5	379,5	694,2	56,1
σ	0,7	1,1	1,2	1,0	0,4	120,9	0,1	2,4
CV	2,9	4,2	4,7	4,2	9,7	25	0,0	3,5

**Таблица 3. Метеорологические данные по полю кукурузы (03.08.16 г.).**  
**Температура воздуха (Ta), влажность воздуха (RH) и атмосферное давление (P)**  
**измерялись на высоте 2,1 м, скорость ветра (u) – на высоте 2,3 м, температура**  
**растительности (Tc) и радиационный баланс (Rn) – на высоте 2,05 м.**

Величина Время	Ta (°C)	Tc (°C)	Ts (°C)	Tr(θs) (°C)	u (м с <sup>-1</sup> )	Rn (Вт м <sup>-2</sup> )	P (мм.рт.ст.)	RH (%)
10:50	19,6	21,3	18,9	20,8	0,7	266,3	763,5	72,6
11:10	19,7	21,1	19,0	20,7	0,9	253,7	763,4	70,2
11:30	19,7	20,7	19,2	20,4	1,4	272,7	763,3	67,6
11:50	19,4	20,6	19,1	20,3	1,5	234,3	763,3	67,3
12:10	19,7	20,9	19,0	20,5	1,2	280,0	763,2	62,7
12:30	19,7	20,4	19,2	20,2	1,2	285,5	763,2	58,3
12:50	19,6	20,3	19,1	20,1	1,0	274,6	763,1	57,7
13:10	19,7	20,1	19,1	19,9	1,0	208,9	763,0	57,9
13:30	19,8	20,0	19,7	19,9	1,2	290,2	763,1	59,6
13:50	19,8	19,9	19,7	19,9	1,2	253,0	763,1	59,4
14:10	20,5	21,1	20,5	21,0	1,0	372,1	763,0	59,5
14:30	21,2	22,2	20,9	21,9	1,3	485,9	762,9	54,2
14:50	21,9	23,2	20,9	22,7	1,0	554,8	762,7	50,5
M	20	20,9	19,6	20,6	1,1	310,2	763,1	61,3
σ	0,8	1,1	0,8	1,0	0,2	113,1	0,2	4,5
CV	3,2	3,7	3,2	3,6	11,4	28,4	0,0	4,9



Для каждого параметра рассчитаны среднее значение ( $M$ ), стандартное отклонение ( $\sigma$ ) и коэффициент вариации ( $CV$ ). Из данных таблиц следует, что микроклиматические параметры приземного слоя воздуха незначительно отличались в дни проведения эксперимента. Различным было только проективное покрытие.

На рис. 5 продемонстрировано влияние проективного покрытия ( $f_c$ ) на дневной ход температур различных поверхностей,

измеренных 14 июля и 3 августа 2016 г. над посевами кукурузы.

Расчеты скрытого потока тепла над растительностью с различным проективным покрытием выполнены при помощи разных методов: 1) Пристли-Тейлора ( $\lambda Ec(PT)$ ), формула (9); 2) Пенмана-Монтейса ( $\lambda Ec(PM)$ ), формула (5); 3) остаточного члена уравнения энергетического баланса ( $\lambda Ec$ ), формула (3). Результаты расчетов представлены на рис. 6.

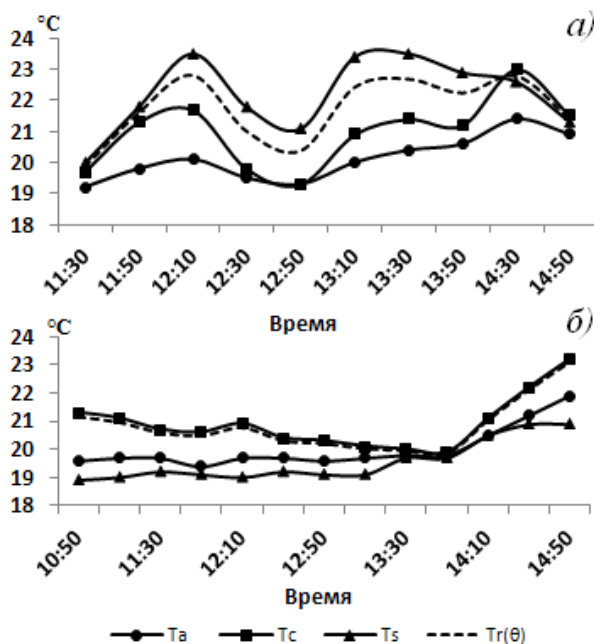


Рис. 5. Дневной ход температур различных поверхностей:  $T_a$  – температура воздуха;  $T_c$  – температура растительности;  $T_s$  – температура почвы;  $Tr(\theta_s)$  – эффективная температура смешанной (растительной и почвенной) поверхности (а – 14.07.16 г.,  $f_c = 0,4$ ; б – 03.08.16 г.,  $f_c = 0,8$ ).

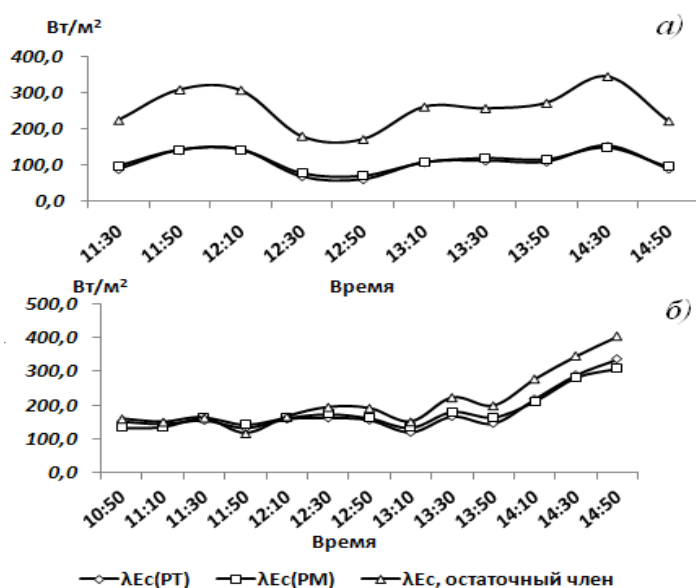


Рис. 6. Скрытые потоки тепла над листовой поверхностью кукурузы: а) 14.07.16 г.,  $f_c = 0,4$ , LAI = 3,4; б) 03.08.16 г.,  $f_c = 0,8$ , LAI = 4,2.



При разряженном растительном покрове (а) установлены совпадение результатов расчета скрытого потока тепла над посевом кукурузы с помощью методов Пенмана-Монтейса и Пристли-Тейлора и отличие от них результата, полученного при расчете с использованием формулы (3). При сомкнутом растительном покрове (б) результаты расчета скрытого потока тепла посредством всех трех методов совпадают.

На рис. 7 представлены кривые распределения испарения (мм/20 мин.) по модели TSEB для кукурузы: транспирация ( $E_c(PT)$ ), испарение с почвы ( $E_s$ ), суммарное испарение ( $ET$ ). Испарение рассчитано по методу остаточного члена уравнения энергетического баланса (формула (1)).

Суммарное испарение ( $E_c(PT)+E_s$ ) представляет собой сумму транспирации (9) и испарения с почвы (3). Из рис. 7 следует, что если посевы развиваются в оптимальных почвенных условиях, то транспирацию можно оценивать по методу Пристли-Тейлора или Пенмана-Монтейса для сомкнутого растительного покрова.

Проведена оценка величин испарения за час для листовой поверхности кукурузы, почвы и эвапотранспирации (табл. 4). При увеличении проективного покрытия рост суммарного испарения при оптимальных почвенных условиях происходит в основном за счет транспирации. Физическое испарение изменяется незначительно при одинаковых условиях окружающей среды.

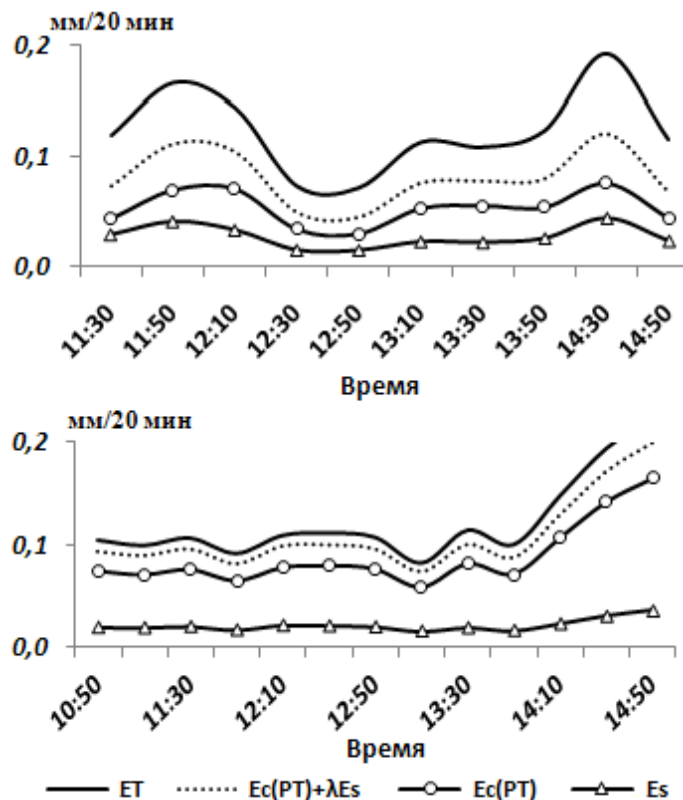


Рис. 7. Транспирация, физическое испарение с почвы и эвапотранспирация с проективным покрытием на опытном участке с посевами кукурузы: а) 14.07.16 г.,  $f_c=0,4$ ,  $LAI=3,4$ ; б) 03.08.16 г.,  $f_c=0,8$ ,  $LAI=4,2$ .

Таблица 4. Испарение с разных поверхностей за час.

Дата	Проективное покрытие	$ET$ , $мм ч^{-1}$	$E_c(PT) + E_s$ , $мм ч^{-1}$	$E_s$ , $мм ч^{-1}$	$E_c(PT)$ , $мм ч^{-1}$
14.07.16	0,4	0,41	0,27	0,09	0,18
03.08.16	0,8	0,39	0,35	0,07	0,28

## ВЫВОДЫ

В настоящей работе была апробирована двухуровневая энергобалансовая модель TSEB, которая позволяет разделить суммарное испарение на транспирацию и испарение с почвы. Экспериментальные данные получены в ходе полевых экспериментов на посевах кукурузы в Ленинградской области. Исследования подтверждают возможность практического использования энергобалансовой модели для разделения эвапотранспирации, а также значимость поверхностных температур

почвы и растительности. Получены оценки скрытого потока тепла над растительностью по методу Пристли-Тейлора и суммарного испарения, транспирации и испарения с почвы по модели TSEB. Подтверждено влияние величины проективного покрытия на потоки тепла и испарение. Метод разделения суммарного испарения на транспирацию и испарение с почвы может быть использован в комплексе с наземными измерениями и данными дистанционного зондирования Земли для пространственного мониторинга сухой биомассы посевов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Козырева Л. В., Доброхотов А. В., Ситдикова Ю. Р., Ефимов А. Е. 2016. Методика оценки составляющих водного и теплового балансов в системе «почва – растение – приземный слой воздуха». СПб.: АФИ. 47 с.
- Козырева Л. В., Ситдикова Ю. Р., Ефимов А. Е., Доброхотов А. В. 2013. Методика оценки биологического водопотребления посевов для решения задач управления водным режимом // *Агрофизика*. №4 (12). С. 12–19.
- Ситдикова Ю. Р., Русин И. Н., Козырева Л. В. 2012. Методика расчета радиационных характеристик с учетом проективного покрытия сельскохозяйственного поля // *Агрофизика*. № 4(8). С. 19–25.
- Якушев В. П., Козырева Л. В., Ситдикова Ю. Р., Ефимов А. Е., Доброхотов А. В. 2015. Автоматизация принятия решений при орошении // *Вестник Российской сельскохозяйственной науки*. № 5. С. 8–10.
- Agam N., Kustas W.P., Anderson M.C. 2010. Application of the Priestley-Taylor in a Two-Source Energy Balance Model // *Journal of Hydrometeorology*, 11, pp. 185–198.
- Allen R. G., Tasumi M., Trezza R. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (metric)-model // *Journal of irrigation and drainage engineering*, pp. 380–393.
- Colaizzi P. D. et al. 2012. Two-source energy balance model estimates of evapotranspiration using component and composite surface temperatures // *Advances in Water Resources*, Vol. 50, pp. 134–151.
- Jackson R. D., Idso S. B., Reginato R. J. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator // *Water Resource*, Vol.17, pp. 1133–1138.
- Kustas W. P., Anderson M. C. 2007. Utility of radiometric – aerodynamic temperature relations for heat flux estimation // *Boundary-Layer Meteorology*, 122, pp. 167–187.
- Shaomin Liu, Lu L., Mao D., Jia L. 2007. Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements // *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, pp. 769–783.
- Norman J. M., Kustas W. P., Humes K. S. 1995. Transactions of the ASABE approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature // *Agric. Forest Meteorol.*, 77(3-4), pp. 263–293.
- Sánchez J. M., Kustas W. P., Caselles V., Anderson M. C. 2008. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations // *Remote Sensing of Environment*, 112, pp. 1130–1143.
- Su Z. 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes // *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, European Geosciences Union, 6 (1), pp. 85–100.