

МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСТЬИЧНОЙ ПРОВОДИМОСТИ У КОРМОВЫХ ТРАВ

А.В. ДОБРОХОТОВ¹, И.Л. МАКСЕНКОВА¹, Л.В. КОЗЫРЕВА¹, Р. ШАНДОР²

Устьичная проводимость (УП) — важный регулятор углеродного и водного обмена растений. Ее расчет используется в моделях фотосинтез—транспирация, а также для оценки роста и развития растений в экосистемах. Если рассматривать посев как «большой лист», то с учетом устойчивости приземного слоя воздуха УП определяется факторами окружающей среды. Внешние условия не только регулируют степень открытости устьиц, но и непосредственно влияют на транспирацию. Нами апробирована предложенная J.M. Blonquist с соавт. (2009) модель оценки УП на основе радиометрических показателей (температура растительного покрова, скрытый и явный потоки тепла как составляющие энергетического баланса посевов) и впервые показана ее применимость при использовании автоматизированных наземных измерений с помощью разработанного агрометеорологического комплекса в сочетании с дистанционным зондированием. Наблюдения проводили 15 и 31 мая 2016 года на поле с кормовыми травами (пос. Бугры, Ленинградская обл., географические координаты соответственно 60°5'6"N, 30°25'27"E и 60°5'16"N, 30°24'32"E). Входные агрометеорологические параметры (температура и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость ветрового потока, радиометрическая температура и радиационный баланс растительного покрова) фиксировали с помощью автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса АМПАК (Агрофизический научно-исследовательский институт) с интервалом 90 с. Наземные измерения выполняли синхронно с дистанционным зондированием со спутника LandSat-8 (США; данные с LandSat-8 размещаются в свободном доступе на портале Геологической службы США — U.S. Geological Survey, <https://www.usgs.gov/>). Спутник оснащен целевой аппаратурой: OLI (Operational Land Imager), получает изображения в видимом (5 каналов) и ближнем инфракрасном (4 канала) диапазонах, TIRS (Thermal InfraRed Sensor) — в дальнем инфракрасном (тепловом) диапазоне (2 канала). Атмосферную коррекцию спутниковых снимков выполняли с помощью модели с открытым исходным кодом 6S (Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum), разработанной группой исследователей из разных стран. Для расчета в ней используются данные об аэрозольной оптической толщине атмосферы для $\lambda = 550$ нм (доступны в системе MODIS) и глобальная цифровая модель рельефа ASTER GDEM (доступна на портале Геологической службы США). Составляющие энергетического баланса (радиационный баланс, поток тепла в почву, скрытый и явный потоки тепла) вычисляли по модели SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) (W.G.M. Bastiaanssen, 1998). При обработке спутниковых снимков проводили расчеты для значения пикселей с NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) > 0,7, что интерпретируется как густая растительность с сомкнутым покровом. Построенные тематические карты радиационного баланса, скрытого и явного потоков тепла использовали для оценки УП. В результате исследований получены тематические карты пространственного распределения устьичной проводимости в экосистеме (поле с кормовыми травами) в зависимости от температуры поверхности растительного покрова и составляющих теплового баланса с учетом стратификации приземного слоя воздуха.

Ключевые слова: устьичная проводимость, устьичное сопротивление, транспирация, уравнение энергетического баланса, температура поверхности растительного покрова, дистанционное зондирование, автоматизированный мобильный полевой агрометеорологический комплекс АМПАК.

Для того чтобы в зависимости от условий оптимизировать потерю воды (транспирацию) и поглощение CO₂ через устьица, растения могут быстро изменять ширину устьичных щелей. Проводимость устьиц меняется под влиянием многочисленных факторов. Скорость транспирации регулируется устьичной проводимостью, которую можно моделировать для листа или растительного покрова в посеве. Современная физиологическая аппаратура (диффузионные порометры, газоанализаторы) (1) позволяют измерять транспирацию и устьичную проводимость на листовой поверхности. Однако прямыми измерениями нельзя оценить пространственное распределение изучаемых величин.

В качестве альтернативы для этого предложены модели, отражающие зависимость устьичной проводимости от факторов окружающей среды. Входными данными здесь служат метеорологические, актинометрические

измерения и аэродинамические параметры подстилающей поверхности. Математическое описание устьичной проводимости широко используется в последние десятилетия. В обзоре G. Danouf с соавт. (1) рассмотрены 35 подобных моделей. Некоторые модели в современных исследованиях наиболее популярны (2-4).

Количественная оценка потоков H_2O и CO_2 в биогеоценозе под влиянием климатических факторов требует развития как экспериментальных, так и модельных методов исследования. Модельные подходы — главный инструмент при изучении энерго- и массообмена, учете пространственной неоднородности и биологических особенностей развития растений в период вегетации (5, 6). Для описания потоков H_2O и CO_2 в системе почва—растительность—приземный слой воздуха разработано множество подходов. Показано, что устьичное сопротивление диффузии водяного пара и CO_2 зависит от большого числа параметров, характеризующих среду обитания растения (солнечная радиация, температура воздуха, условия в приземном слое воздуха, скорость ветра, концентрация CO_2 , дефицит влажности воздуха и почвы и т.д.) и его состояния (7-11).

Устьичную регуляцию диффузионного сопротивления можно рассматривать как кибернетическую систему с различными обратными связями (7). Одна из них активизируется при изменении парциального давления CO_2 в межклетниках, другая обеспечивает быструю реакцию устьичного аппарата на колебания относительной влажности воздуха. Обе эти связи проявляются в течение нескольких минут и управляют устьичной проводимостью при оптимальном водном режиме.

При моделировании водного и углеродного обмена растений выделяют несколько информационных уровней: на первых трех устьичная регуляция не учитывается, массообмен рассчитывается по водному потенциалу почвы либо определяется на основании данных о водном потенциале листа, солнечной радиации и других факторах внешней среды; на четвертом используются специализированные модели, которые способны имитировать реакцию устьичного аппарата на колебания факторов внешней среды. По аналогии с законом Ома предложено вместо устьичной проводимости (g_s) использовать сопротивление (r_s) (7). В модели, описанной G.S. Campbell с соавт. (12), устьичная проводимость, тепловой и водный потоки над поверхностью растительного покрова измеряются в молярных единицах. Связь между устьичной проводимостью и сопротивлением нелинейная и зависит от температуры воздуха и атмосферного давления (13). Устьичное сопротивление (r_s , $c \cdot m^{-1}$) выражается через устьичную проводимость (g_s) и молекулярную плотность воздуха (ρ_{mol} , $моль \cdot м^{-2} \cdot c^{-1}$) следующим образом:

$$r_s = \frac{\rho_{mol}}{g_s} . \quad [1]$$

Молекулярная плотность воздуха зависит от атмосферного давления (P) и температуры окружающего воздуха (T) (12):

$$\rho_{mol} = 44,6 \frac{P}{101,3} \frac{273,15}{T} . \quad [2]$$

Перенос водяного пара происходит около поверхности растительного покрова посредством турбулентного и молекулярного обмена. Поток водяного пара из устьичной полости обусловлен молекулярной диффузией и в соответствии с законом Фика пропорционален локальному градиенту плотности водяного пара.

В настоящем исследовании нами впервые показано применение модели расчета устьичной проводимости (13) по спутниковым данным о распределении температуры поверхности и отражательной способности в видимом и ближнем ИК диапазонах в сочетании с параметрами, которые были получены при синхронных наземных подспутниковых измерениях с помощью разработанного ранее автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса АМПАК (5). В результате построены тематические карты пространственного распределения устьичной проводимости на исследуемых полях. Кроме того, устьичная проводимость «в точке» рассчитывалась по данным измерений АМПАК.

Целью работы была апробация методов мониторинга устьичной проводимости и ее пространственного распределения в автоматическом режиме (по данным спутникового дистанционного зондирования в сочетании с наземными метеорологическими измерениями) с использованием математического моделирования.

Методика. Устьичную проводимость рассчитывали для полей с кормовыми травами в районе поселка Бугры (Ленинградская обл., 60°5'6"N, 30°25'27"E) по данным на 15 мая 2016 года и 31 мая 2016 года.

Для оценки устьичной проводимости была выбрана модель, предложенная J.M. Blonquist с соавт. (13). В ней используются наземные автоматизированные измерения температуры растительности с помощью инфракрасных термометров в совокупности с расчетом радиационного баланса и составляющих теплового баланса. Уравнение теплового баланса над поверхностью растительности имеет вид:

$$R_{nc} = H_c + \lambda E_c + A_n, \quad [3]$$

где R_{nc} — радиационный баланс над поверхностью растений, Вт · м⁻²; H_c и λE_c — соответственно явный и скрытый потоки тепла, Вт · м⁻²; A_n — поток углекислого газа, Вт · м⁻². Потоком углекислого газа в тепловом балансе обычно пренебрегают (за исключением тех случаев, когда его определение составляет цель исследования).

Данные дистанционного зондирования поступали с американского спутника LandSat-8 (размещаются в свободном доступе на портале Геологической службы США — U.S. Geological Survey, <https://www.usgs.gov/>). Спутник оснащен целевой аппаратурой: OLI (Operational Land Imager), получает изображения в видимом (5 каналов) и ближнем инфракрасном (4 канала) диапазонах, TIRS (Thermal InfraRed Sensor) — в дальнем инфракрасном (тепловом) диапазоне (2 канала) (14).

Для преобразования яркостной температуры (спутниковые снимки) в истинную использовали алгоритм (15), основанный на сравнении данных с двух тепловых каналов спутника LandSat-8 и классификации земной поверхности по типам подстилающей поверхности.

Для получения сведений о пространственном распределении радиационного баланса, суммарного испарения и турбулентного потока тепла с учетом стратификации приземного слоя воздуха применили модель SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) (16, 17), основанную на уравнении теплового баланса, и данные спутникового зондирования в видимом, ближнем инфракрасном (ИК) и тепловом диапазонах спектра.

При атмосферной коррекции данных со спутника в видимом и ближнем ИК диапазонах использовали модель с открытым исходным кодом 6S (Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum) (18-20), описывающую прохождение электромагнитного излучения через атмосферу. Необходимые для этих вычислений показатели состояния атмосферы

(аэрозольная оптическая толщина атмосферы при $\lambda = 550$ нм) свободно предоставляются системой MODIS (21), глобальная цифровая модель рельефа ASTER GDEM (22) с возможностью извлечения локальных сведений, — Геологической службой США.

Дополнительные наземные измерения скорости ветра в одной точке (необходимы для модели SEBAL), а также температуры и влажности воздуха, атмосферного давления (требуются для подстановки в модель пространственного распределения устьичной проводимости) (13) выполняли синхронно со спутниковой съемкой с помощью автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса АМПАК (разработан в Агрофизическом институте) (5), который оснащен датчиками температуры воздуха HEL-705-U-1-12-C2, относительной влажности воздуха НН-4602-С и атмосферного давления МРХ4115АР («Honeywell International Inc.», США), а также скорости ветра Windgeschwindigkeitssensor («Hydrometeorologische Instrumente und Messanlagen», Германия) (временной интервал метеорологических подспутниковых измерений — 90 с).

Исполняя функции наземной метеостанции для подспутниковых измерений, АМПАК также использовался в качестве самостоятельного средства для автоматизированного мониторинга устьичной проводимости и составляющих теплового баланса «в точке». В АМПАК имеется инфракрасный датчик температуры Optris СТ LT («Optris GmbH», Германия) и балансомер Пеленг СФ-08 (ОАО «Пеленг», Республика Беларусь) для определения температуры поверхности растительности и радиационного баланса, на основе которых производили расчет устьичной проводимости «в точке».

Устьичную проводимость g_s вычисляли по формуле J.M. Blonquist с соавт. (13):

$$g_s = \frac{g_V P [(R_{nc} - A_n) - g_H C_p (T_c - T_a)]}{g_V \lambda (e_{sc} - e_a) - P [(R_{nc} - A_n) - g_H C_p (T_c - T_a)]}, \quad [4]$$

где T_c — радиометрическая температура поверхности растительного покрова, °С; T_a — температура воздуха, °С; C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж · кг⁻¹ · К⁻¹; λ — скрытая теплота парообразования, МДж · кг⁻¹; e_{sc} — давление насыщения водяного пара при температуре растительности T_c , кПа; e_a — парциальное давление водяного пара, кПа; P — атмосферное давление, кПа; g_H — теплопроводность в приземном слое воздуха, моль · м² · с⁻¹; g_V — проводимость водяного пара в приземном слое воздуха, моль · м⁻² · с⁻¹.

Теплопроводность в приземном слое воздуха (g_H), где потоки уже не испытывают влияния молекулярной вязкости, рассчитывали с учетом шероховатости подстилающей поверхности [5]. Нижний и верхний уровни этого слоя зависят от параметров шероховатости для потока количества движения (z_m), потока тепла (z_h) и водяного пара (z_v) над слоем вытеснения (d) (23):

$$g_H = \frac{u_p \text{ mol } k^2}{[\ln(z_u - d/z_m) - \Psi_m][\ln(z_{Ta} - d/z_h) - \Psi_h]}. \quad [5]$$

Параметры шероховатости могут быть определены как $d = 0,65h_c$, $z_m = 0,123h_c$, $z_h = 0,1z_m$, $z_v \approx z_h$; z_u и z_{Ta} — высоты измерений соответственно скорости и температуры воздуха; h_c — высота растительного покрова; k — постоянная Кармана; u — скорость ветрового потока на высоте z_u ; Ψ_m , Ψ_h — универсальные функции для потока количества движения и тепла (23-25).

Проводимость водяного пара в слое растительности g_V рассчитыва-

ется аналогично g_H по формуле [5] с соответствующими параметрами.

Результаты. При первом определении (15 мая) значения устьичной проводимости g_s , полученные по модели (13) с помощью автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса АМПАК при измерениях температуры поверхности растительного покрова и радиационного баланса «в точке», в целом оказались ниже, чем при втором (31 мая) (рис. 1).

Наблюдаемый результат можно объяснить тем фактом, что 31 мая при схожих метеорологических условиях температура поверхности растительного покрова оказалась ниже температуры воздуха, наблюдался оазисный эффект, и турбулентный поток тепла был направлен в сторону растительной поверхности. При измерениях 15 мая температура поверхности превышала температуру воздуха, следовательно, радиационный баланс отражал не только транспирацию и фотосинтез, но и турбулентный поток тепла от поверхности растительного покрова.

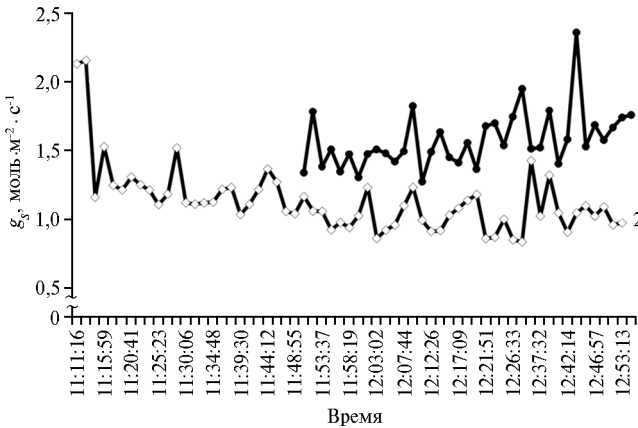


Рис 1. Оценка устьичной проводимости (g_s) в посевах кормовых трав при расчете по модели J.M. Blonquist с соавт. (13) на основе агрометеорологических измерений: 1 и 2 — регистрация метеорологических показателей 15 мая (60°5'6"N, 30°25'27"E) и 31 мая (60°5'16"N, 30°24'32"E) (пос. Бугры, Ленинградская обл., 2016 год). Измерения выполнены с помощью автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса АМПАК (5).

При обработке данных дистанционного зондирования и подспутникового мониторинга после атмосферной коррекции снимков со спутника LandSat-8 с помощью модели 6S (18-20) мы получили значения отражательной способности в видимом (5 каналов) и ближнем ИК диапазонах (4 канала), которые использовали для расчетов радиационных и аэродинамических характеристик растительности по модели SEBAL. Далее с помощью алгоритма, предложенного С. Du с соавт. (15), рассчитали истинную температуру поверхности для подстановки в формулу при расчете устьичной проводимости по используемой модели (13).

Классификация спутникового снимка по типам подстилающей поверхности, индексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и наземные измерения скорости ветра позволили рассчитать пространственное распределение параметров шероховатости для потока тепла и количества движения, необходимые для оценки турбулентного потока тепла. Для оценки пространственного распределения устьичной проводимости были построены тематические карты всех составляющих теплового баланса, рассчитанные по модели SEBAL с учетом наземных метеоизмерений с помощью системы АМПАК.

В итоге на основании спутниковых данных (время пролета спутника примерно 12⁰⁴) и результатов наземных измерений были построены тематические карты и гистограммы устьичной проводимости g_s (рис. 2). В среднем значения устьичной проводимости (как и при определении «в точке») 15 мая оказались ниже, чем 31 мая. На участках с высокой устьичной проводимостью значения g_s оказались примерно в 2 раза выше, чем

на участках с низкой.

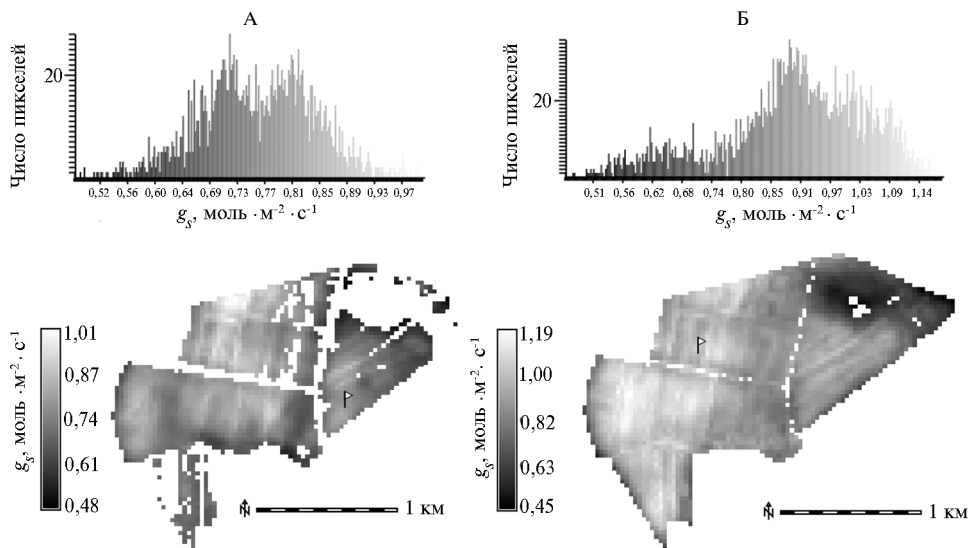


Рис. 2. Пространственное распределение устьичной проводимости (g_s) в посевах кормовых трав при оценке с использованием модели J.M. Blonquist с соавт. (13) в сочетании с моделью SEBAL (17) и снимков со спутника LandSat-8 (США) (14): А и Б — соответственно на 15 и 31 мая 2016 года; верхний ряд — гистограмма значений проводимости, нижний ряд — пиксельные характеристики снимков (пос. Бугры, Ленинградская обл., 2016 год). Флажком отмечено место наземной регистрации данных автоматизированным мобильным полевым агрометеорологическим комплексом АМПАК (5) (15 мая — $60^{\circ}5'6''N$, $30^{\circ}25'27''E$; 31 мая — $60^{\circ}5'16''N$, $30^{\circ}24'32''E$). Масштабная линейка 1 км.

Таким образом, показано, что апробированная модель может быть использована для автоматизированного мониторинга пространственного распределения устьичной проводимости у растительности с применением данных радиометрического измерения температуры поверхности растительного покрова, модельного расчета составляющих теплового баланса подстилающей поверхности, полученных с помощью дистанционного зондирования в совокупности с синхронными наземными измерениями температуры и влажности воздуха, атмосферного давления и скорости ветрового потока. Для повышения точности расчета устьичной проводимости необходима высокая чувствительность определения истинной температуры растительного покрова с учетом его излучательной способности, также необходимо применение высокоточной атмосферной коррекции каналов спутников для получения истинных земных характеристик без влияния атмосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Damour G., Simonneau T., Cochard H., Urban L. An overview of models of stomatal conductance at leaf level. *Plant, Cell & Environment*, 2010, 33: 1419–1438 (doi: 10.1111/j.1365-3040.2010.02181.x).
2. Gao Q., Zhao P., Zeng X., Cai X., Shen W. A model of stomatal conductance to quantify the relationship between leaf transpiration, microclimate and soil water stress. *Plant, Cell & Environment*, 2002, 25(11): 1373–1381 (doi: 10.1046/j.1365-3040.2002.00926.x).
3. Lu P., Yunusa I.A., Walker R.R., Müller W.J. Regulation of canopy conductance and transpiration and their modelling in irrigated grapevines. *Funct. Plant Biol.*, 2003, 30(6): 689–698 (doi: 10.1071/FP02181).
4. Liu F., Andersen M.N., Jensen C.R. Capability of the 'Ball-Berry' model for predicting stomatal conductance and water use efficiency of potato leaves under different irrigation regimes. *Scientia Horticulturae*, 2009, 122(3): 346–354 (doi: 10.1016/j.scienta.2009.05.026).
5. Козырева Л.В., Доброхотов А.В., Ситдикова Ю.Р., Ефимов А.Е. Методика оценки составляющих водного и теплового балансов в системе «почва—растение—призем-

- ный слой воздуха» с учетом стратификации приземного слоя, неоднородности подстилающей поверхности с использованием данных дистанционного зондирования земли и наземной калибровки автоматизированным мобильным полевым комплексом (АМПАК). СПб, 2016.
6. Allen R.G., Tasumi M., Trezza R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *J. Irrig. Drain. E-ASCE*, 2007, 133(4): 380-394 (doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380)).
 7. Сиротенко О.Д. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том II. Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Кн. I. Математические модели в агрометеорологии. Обнинск, 2012.
 8. Steduto P., Hsiao T.C., Raes D., Fereres E. AquaCrop — The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 2009, 101(3): 426-437 (doi: 10.2134/agnonj2008.0139s).
 9. Raes D., Steduto P., Hsiao T. C., Fereres E. AquaCrop the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 2009, 101(3): 438-447 (doi: 10.2134/agnonj2008.0140s).
 10. Полуэктов Р.А., Опарина И.В., Терлеев В.В. Три способа расчета динамики почвенной влаги. *Метеорология и гидрология*, 2003, 11: 90-98.
 11. Perez P.J., Lecina S., Castellvi F., Martínez-Cob A., Villalobos F.J. A simple parameterization of bulk canopy resistance from climatic variables for estimating hourly evapotranspiration. *Hydrol. Process.*, 2006, 20(3): 515-532 (doi: 10.1002/hyp.5919).
 12. Campbell G.S., Norman J.M. An introduction to environmental biophysics. Springer-Verlag, NY, 1998 (doi: 10.1007/978-1-4612-1626-1).
 13. Blonquist J.M., Norman J.M., Bugbee B. Automated measurement of canopy stomatal conductance based on infrared temperature. *Agr. Forest Meteorol.*, 2009, 149(12): 2183-2197 (doi: 10.1016/j.agrformet.2009.10.003).
 14. Roy D.P., Wulder M.A., Loveland T.R., Woodcock C.E., Allen R.G. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sens. Environ.*, 2014, 145: 154-172 (doi: 10.1016/j.rse.2014.02.001).
 15. Du C., Ren H., Qin Q., Meng J., Zhao S. A practical split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 data. *Remote Sens.*, 2015, 7(1): 647-665 (doi: 10.3390/rs70100647).
 16. Bastiaanssen W.G.M., Noordman E.J.M., Pelgrum H., Davids G., Thorson B.P., Allen R.G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *J. Irrig. Drain. E-ASCE*, 2005, 131(1): 85-93 (doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(85)).
 17. Allen R.G., Tasumi M., Trezza R., Waters R., Bastiaanssen W. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Advance Training and Users Manual. Idaho Implementation, 2002, V. 1.
 18. Vermote E.F., Tanré D., Deuze J.L., Herman M., Morcette J.J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 675-686 (doi: 10.1109/36.581987).
 19. Kotchenova S.Y., Vermote E.F., Matarrese R., Klemm F.J., Jr. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: Path radiance. *Appl. Optics*, 2006, 45(26): 6762-6774 (doi: 10.1364/AO.45.006762).
 20. Kotchenova S.Y., Vermote E.F. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part II. Homogeneous Lambertian and anisotropic surfaces. *Appl. Optics*, 2007, 46(20): 4455-4464 (doi: 10.1364/AO.46.004455).
 21. Remer L.A., Kaufman Y.J., Tanré D., Mattoo S., Chu D.A., Martins J.V., Li R.R., Ichoku C., Levy R.C., Kleidman R.G., Eck T.F., Vermote E., Holben B.N. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. *J. Atmos. Sci.*, 2005, 62(4): 947-973 (doi: 10.1175/JAS3385.1).
 22. Tachikawa T., Hato M., Kaku M., Iwasaki A. Characteristics of ASTER GDEM version 2. Proc. 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Vancouver, BC, 2011: 3657-3660 (doi: 10.1109/IGARSS.2011.6050017).
 23. Allen R.G., Pruitt W.O., Wright J.L., Howell T.A., Ventura F., Snyder R., Smith M. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agr. Water Manage.*, 2006, 81(1): 1-22 (doi: 10.1016/j.agwat.2005.03.007).
 24. Зилитинкевич С.С. Атмосферная турбулентность и планетарные пограничные слои. М., 2013.
 25. Pagowski M. An iterative solution of flux-profile relationships in the surface layer for regional model applications. *Atmos. Environ.*, 2006, 40(35): 6892-6897 (doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.07.027).

¹ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт, Поступила в редакцию
 195220 Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, *28 марта 2017 года*
 e-mail: dobralexey@gmail.com, ilona_maksenkova@mail.ru, fludak@gmail.com;

²Institute for Soil Sciences and Agricultural,

MODEL-BASED ASSESSMENT OF SPATIAL DISTRIBUTION OF STOMATAL CONDUCTANCE IN FORAGE HERB ECOSYSTEMS

A.V. Dobrokhotov¹, I.L. Maksenkova¹, L.V. Kozyreva¹, R. Sándor²

¹*Agrophysical Research Institute, Federal Agency of Scientific Organizations, 14, Grazhdanskii prosp., St. Petersburg, 195220 Russia, e-mail dobrolexey@gmail.com, ilona_maksenkova@mail.ru, 4ludak@gmail.com (corresponding author);*

²*Institute for Soil Sciences and Agricultural, Centre for Agricultural Research, Chemistry Hungarian Academy of Science, 1022 Hungary, Budapest, Herman Ottó str. 15, e-mail sandor.renata@agrar.mta.hu*

ORCID:

Dobrokhotov A.V. orcid.org/0000-0002-9368-6229;

Kozyreva L.V. orcid.org/0000-0001-7990-8211;

Maksenkova I.L. orcid.org/0000-0003-4982-6180;

Sándor R. orcid.org/0000-0001-5132-1945

The authors declare no conflict of interests

Received March 28, 2017

doi: 10.15389/agrobiology.2017.3.446eng

Abstract

Stomatal conductance is an important factor which controls carbon and water exchange. By changing stomatal width, a canopy simultaneously controls both the carbon dioxide supply and water loss during transpiration. Stomatal conductance is a parameter of photosynthesis and can help to estimate canopy growth and development in ecosystems. Therefore, it is a necessary component of transpiration models. The aim of this study was to validate a stomatal conductance model using radiometric measurements of energy balance parameters for vegetated surfaces: vegetated surface temperature, sensible and latent heat flux. Considering atmospheric surface layer stability, the crop was assumed to be a «big-leaf», with stomatal conductance influenced by environmental factors. External conditions not only control stomata width, but also directly affect the transpiration processes. We have tested the stomatal conductance model by J.M. Blonquist et al. (2009) based on radiometric canopy temperature and energy balance components such as latent and sensible heat fluxes. The applicability of the model for estimating stomatal conductance using automated ground-based measurements and remote sensing was first shown. Observations were carried out at two locations with forage herbs (60°5'6"N, 30°25'27"E and 60°5'16"N, 30°24'32"E) at Bugry in the Leningradskaya Province (on May 15 and 31, 2016, respectively). Model inputs, such as air temperature and humidity, atmospheric pressure, wind speed, radiometric temperature and net radiation of vegetated surface were measured with automatic mobile field agrometeorological equipment AMFAE (Agrophysical Research Institute), with measurements taken every 90 seconds. Ground observations were carried out simultaneously with LandSat-8 satellite data surveys. LandSat-8 is an American Earth observation satellite, it contains two instruments: OLI (Operational Land Imager) has 5 visible bands and 4 near infrared bands, TIRS (Thermal InfraRed Sensor) has 2 longwave infrared bands. LandSat-8 data is freely available on the US Geological Survey. Atmospheric correction of satellite imagery was made using the 6S (Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum) open source model with publicly available data of aerosol optical depth at 550 nm provided by the MODIS system and the global digital elevation model ASTER GDEM (data is freely available on the US Geological Survey). Components of the energy balance including net radiation, soil heat flux, sensible and latent heat flux were calculated with the SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) model by W.G.M. Bastiaanssen (1998) using the ground observation meteorological data from AMFAE. Obtained maps of net radiation and sensible and latent heat fluxes were used to estimate the spatial distribution of stomatal conductance over the forage herbs. For stomatal conductance calculations the LandSat-8 data for pixel values representing dense vegetation (NDVI > 0.7) were used. As a result of the study, maps of forage herbs stomatal conductance were obtained depending on the canopy temperature and the components of the energy balance with a stratification of the atmosphere boundary layer.

Keywords: stomatal conductance, stomatal resistance, transpiration, energy balance equation, vegetation surface temperature, LandSat-8, automatic mobile field agrometeorological equipment — AMFAE.

Научные собрания

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ И СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО В XXI ВЕКЕ»,
посвященная 130-летию со дня рождения Н.И. Вавилова

(21-22 сентября 2017 года, ФГБНУ ВНИИФ)

Контакты и информация: <http://vniif.ru/activities/2017/page/1447>