



УДК 551.511.6

DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.30.26>

## Параметризация скрытого и явного потоков тепла в стратифицированном слое воздуха над растительной поверхностью

Л. В. Козырева, А. В. Доброхотов

*Агрофизический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Целью работы является валидация и апробация метода оценки скрытого и явного потоков тепла в дневное время над растительной поверхностью и оценка влияния стратификации приземного слоя воздуха на точность расчетов. Метод расчета скрытого потока тепла включает анализ показателей термической устойчивости с использованием масштаба Монины – Обухова, который определяется методом итераций на основании данных экспериментальных измерений. Валидация расчетов проведена по данным кросс-ковариационных измерений потоковой станции, расположенной в штате Небраска (США). Индекс эффективности модели (критерий Нэша – Сатклиффа) для скрытого потока тепла без стратификации – 0,55, со стратификацией – 0,80; индекс согласия Вильмотта – 0,91 и 0,96; среднеквадратическое отклонение – 102,6 и 68,7 Вт/м<sup>2</sup> соответственно. Индекс эффективности модели (критерий Нэша – Сатклиффа) для явного потока тепла без стратификации – 1,34, со стратификацией – 0,37; индекс согласия Вильмотта – 0,76 и 0,88; среднеквадратическое отклонение 102,4 и 53,3 Вт/м<sup>2</sup> соответственно. Апробация метода проведена над посевами сельскохозяйственных культур Ленинградской области при различных условиях стратификации.

**Ключевые слова:** скрытый поток тепла, явный поток тепла, стратификация, масштаб Монины – Обухова, параметризация.

**Для цитирования:** Козырева Л. В., Доброхотов А. В. Параметризация скрытого и явного потоков тепла в стратифицированном слое воздуха над растительной поверхностью // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2019. Т. 30. С. 26–37. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.30.26>

### Введение

Энергомассообмен между атмосферой и деятельной растительной поверхностью выступает основным фактором, определяющим микроклиматические особенности сельскохозяйственного поля. Наиболее значимой составляющей теплового баланса для сельского хозяйства является скрытый поток тепла (суммарное испарение,  $\lambda ET$ ), зависящий от приходящей радиации, температуры и влажности воздуха, скорости ветра, биологических особенностей посевов.

Методы количественной оценки скрытого потока тепла разрабатывались многими отечественными и зарубежными авторами [Братсерт, 1985; Будаговский, 1964]. При наличии градиентных измерений температуры и влажности воздуха и допущении о равенстве коэффициентов переноса тепла

и водяного пара оценку скрытого ( $\lambda ET$ ) и явного ( $H$ ) потоков тепла в приземном слое атмосферы можно проводить через отношение этих потоков (отношение Боуэна) [Bowen, 1926; Assessment of reliability ... , 1999; Gavilán, Berengena, 2007]. Однако градиентные измерения в настоящий момент имеют неширокое распространение, современные методы в основном опираются на бесконтактные измерения температуры деятельной поверхности [Allen, Tasumi, Trezza, 2007].

Скрытый поток тепла также может быть непосредственно измерен. В последнее время широкое распространение получил кросс-ковариационный метод измерений потоков тепла и влаги [Burba, 2013]. Кросс-ковариационный метод активно применяется на потоковых станциях сети FluxNet [Baldocchi, 2001]. Данный метод измерений довольно дорогостоящий и оценивает скрытый и явный потоки тепла в определенной точке, поэтому в настоящее время разрабатываются методы количественной оценки, позволяющие проводить расчет скрытого и явного потоков тепла по данным стандартных метеорологических и фенологических измерений в совокупности с дистанционными измерениями температуры деятельной поверхности.

В целях настоящего исследования были осуществлены валидация и апробация метода автоматизированного расчета скрытого и явного потоков тепла с учетом стратификации приземного слоя воздуха, проведен анализ влияния стратификации на точность расчета.

### Объекты и методы исследования

Скрытый поток тепла, или суммарное испарение с подстилающей поверхности, может быть определен как остаточный член уравнения энергетического баланса:

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

где  $\lambda ET$  – скрытый поток тепла, Вт/м<sup>2</sup>;  $R_n$  – радиационный баланс, Вт/м<sup>2</sup>;  $G$  – поток тепла в почву, Вт/м<sup>2</sup>;  $H$  – турбулентный поток тепла, Вт/м<sup>2</sup>.

Радиационный баланс зависит от положения Солнца, географического положения, прозрачности атмосферы, облачности и характеристик подстилающей поверхности. Радиационный баланс может быть рассчитан или непосредственно измерен [Crop evapotranspiration: guidelines ... , 1998; Доброхотов, 2018]. В данной работе использовались измеренные балансом значения радиационного баланса.

Явный, или турбулентный, поток тепла может быть определен через разность температуры подстилающей поверхности и температуры воздуха ( $T_s - T_a$ ) и аэродинамическое сопротивление потоку тепла ( $r_{ah}$ ) в приземном слое воздуха:

$$H = \frac{\rho C_p (T_s - T_a)}{r_{ah}}, \quad (2)$$

где  $T_a$  – температура воздуха, °C;  $T_s$  – температура поверхности, °C;  $C_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/кг·К;  $r_{ah}$  – аэродинамическое сопротивление потоку тепла, с/м;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Температура воздуха ( $T_a$ ) измеряется на метеорологических станциях стандартной сети, температура поверхности ( $T_s$ ) может быть получена из данных дистанционного зондирования или из измерений пирометров.

Поток тепла в почву ( $G$ ) рассчитывается с использованием радиационного баланса и проективного покрытия ( $f_c$ ) или измеренного индекса листовой поверхности  $LAI$  (формулы 3, 4а, 4б) [Su, 2002; Allen, Tasumi, Trezza, 2007]:

$$G = R_n \cdot [\Gamma_c + (1 - f_c) \cdot (\Gamma_s - \Gamma_c)], \quad (3)$$

где  $\Gamma_c = 0,05$  и  $\Gamma_s = 0,315$  – коэффициенты для растительности и оголенной почвы соответственно.

$$G = (0,05 + 0,18 \cdot \exp(-0,521 \cdot LAI)) \cdot R_n \text{ при } LAI \geq 0,5; \quad (4a)$$

$$G = (1,8 \cdot (T_s - 273) / R_n + 0,084) \cdot R_n \text{ при } LAI < 0,5 \quad (4б)$$

Для учета шероховатости поверхности используют аэродинамическое сопротивление переносу потока тепла ( $r_{ah}$ ) [Evaluating parameterizations of aerodynamic ..., 2007] и динамическую скорость ( $u_*$ ) [Vernof, De Bruin, Van Den Hurk, 1997], которые определяются по формулам:

$$r_{ah} = \frac{1}{k^2 u} \left[ \ln \left( \frac{z-d}{z_{0m}} \right) - \psi_m \right] \left[ \ln \left( \frac{z-d}{z_{0h}} \right) - \psi_h \right], \quad (5)$$

$$u_* = ku \left[ \ln \left( \frac{z-d}{z_{0h}} \right) - \psi_h \right]^{-1}, \quad (6)$$

где  $k$  – постоянная Кармана, равная 0,41;  $u$  – скорость ветра, м/с;  $z$  – высота измерения скорости ветра, м;  $d$  – высота слоя вытеснения ( $d = 2/3 h_c$  [Crop evapotranspiration: guidelines ..., 1998],  $h_c$  – высота растительности), м;  $z_{0m}$  – параметр шероховатости для количества движения ( $z_{0m} = 0,123 h_c$  [Crop evapotranspiration: guidelines ..., 1998]), м;  $z_{0h}$  – параметр шероховатости для потока тепла ( $z_{0h} = 0,1 z_{0m}$  [Crop evapotranspiration: guidelines ..., 1998]), м;  $\psi_m, \psi_h$  – универсальные функции для учета стратификации приземного слоя воздуха.

Универсальные функции  $\psi_m, \psi_h$  позволяют скорректировать аэродинамическое сопротивление и турбулентный поток тепла при стратификации приземного слоя воздуха. Зависимость состояния стратификации приземного слоя воздуха от показателя термической устойчивости приведены в [Allen, Tasumi, Trezza, 2007; Pagowski, 2006; Beljaars, Holtstag, 1991; Paulson, 1970; Akylas, Tombrou, 2005]. Формулы для оценки универсальных функций в зависимости от масштаба Монина – Обухова ( $L$ ) [Монин, Обухов, 1953, 1954] с учетом параметров шероховатости потока тепла  $z_{0h}$  и количества движения  $z_{0m}$  на растительной поверхности для разных типов стратификации приведены ниже [Evaluating parameterizations of aerodynamic ..., 2007].

Неустойчивая стратификация,  $L < 0$ :

$$\Psi_m (\zeta, \zeta_{0m}) = 2 \ln \left( \frac{1+x}{1+x_0} \right) + \ln \left( \frac{1+x^2}{1+x_0^2} \right) - 2 \tan^{-1} x + 2 \tan^{-1} x_0; \quad (7)$$

$$\Psi_h (\zeta, \zeta_{0h}) = 2 \ln \left( \frac{1+y}{1+y_0} \right); \quad (8)$$

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

$$x_0 = \left( 1 - 16 \frac{z_{0m}}{L} \right)^{0,25}, \quad y_0 = \left( 1 - 16 \frac{z_{0h}}{L} \right)^{0,5}. \quad (9)$$

Устойчивая стратификация,  $L > 0$ :

$$\Psi_m (\zeta, \zeta_{0m}) = -5(\zeta - \zeta_{0m}); \quad (10)$$

$$\Psi_h (\zeta, \zeta_{0h}) = -5(\zeta - \zeta_{0h}). \quad (11)$$

Нейтральная стратификация,  $|L| \rightarrow \infty$ :

$$\Psi_m = \Psi_h = 0; \quad (12)$$

$$\zeta = \frac{z-d}{L}; \zeta_{0m} = \frac{z_{0m}}{L}; \zeta_{0h} = \frac{z_{0h}}{L}. \quad (13)$$

Масштаб Монина – Обухова ( $L$ ) рассчитывается по формуле

$$L = -\frac{\rho C_p u_*^3 T_a}{kgH}, \quad (14)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, равное  $9,8 \text{ м/с}^2$ .

При расчете  $L$  используется турбулентный поток тепла  $H$ , который определяется методом итераций. При первой итерации вычисляется турбулентный поток тепла  $H$  при нейтральной стратификации с универсальными функциями  $\Psi_m = 0$ ;  $\Psi_h = 0$ . Затем по значению турбулентного потока тепла  $H$  при нейтральной стратификации вычисляется масштаб Монина – Обухова  $L$ , после чего вычисляются универсальные функции  $\Psi_m$ ,  $\Psi_h$  для расчета уточненных значений аэродинамического сопротивления и динамической скорости, которые снова используются для расчета  $H$ .

Для валидации метода расчета были использованы данные кросс-ковариационных измерений составляющих энергетического баланса и ручных фенологических наблюдений, проведенных на потоковой станции FluxNet Ne-1 (США, штата Небраска,  $41^\circ 09' 54''$  с. ш.,  $96^\circ 28' 36''$  з. д.) над полем кукурузы в период 2001–2005 гг. [Suyker, 2016]. Измерения на потоковых станциях производятся кросс-ковариационным методом с применением акустических анемометров и газоанализаторов. На потоковой станции также измеряются необходимые метеорологические величины: температура и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость ветра, радиационный баланс, уходящее длинноволновое излучение растительного покрова. Фенологические наблюдения проводились один раз в неделю, были использова-

ны наблюдения за высотой растительности  $h_c$  и листовым индексом  $LAI$ , применялась линейная интерполяция для получения значений  $h_c$  и  $LAI$  за каждые сутки. Для валидации метода было выбрано 42 дня в различные фазы вегетации при различных условиях стратификации приземного слоя воздуха. В итоге было привлечено 1025 точек измерений составляющих энергетического баланса (неустойчивая стратификация – 348 точек, устойчивая – 562 точки, нейтральная – 115 точек). При вычислении прибегли к формуле для расчета потока тепла в почву  $G$ , использующей листовую индекс  $LAI$  (4а, 4б). Для расчета турбулентного потока тепла  $H$  проведено 10 итераций, так как этого достаточно для достижения необходимой точности по методике METRIC.

Апробация метода оценки скрытого и явного потоков тепла с учетом стратификации приземного слоя воздуха осуществлялась в форме полевых экспериментов на опытных сельскохозяйственных полях Ленинградской области с различными условиями стратификации. Основные характеристики полевых измерений приведены в табл. 1. Описание метеорологических условий представлено в табл. 2, указаны средние величины метеорологических параметров за период измерений.

Таблица 1

Параметры экспериментов на опытных площадках  
Агрофизического научно-исследовательского института

Вид растений	Дата измерений, место	Географические координаты полей	Высота над у. м., м	Сорт	$h_c$ , м	$f_c$ , %
Кукуруза	04.08.2015, АФИ	60°0'1" с. ш. 30°22'58" в. д.	33,6	Утренняя песня	0,90	0,4
Рапс	18.07.2014, МОС	59°25'33" с. ш. 30°1'50" в. д.	105	Оредеж-4	1	0,9
Амарант	09.07.2015, АФИ	60°0'1" с. ш. 30°22'58" в. д.	33,6	Крепыш	0,43	0,82

Таблица 2

Описание метеорологических условий на опытных площадках  
Агрофизического научно-исследовательского института

Вид растений	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Атмосферное давление, мм рт. ст.	Скорость ветра, м/с	Радиационный баланс, Вт/м <sup>2</sup>	Температура растительного покрова, °С
Кукуруза	20,4	60	769,8	0,9	467	23,2
Рапс	24	40	760,9	1,5	509	21,6
Амарант	20,4	60	754,4	0,8	406	21,5

Для обеспечения измерений метеорологических величин при расчете скрытого и явного потоков тепла в Агрофизическом институте был разработан автоматизированный мобильный полевой агрометеорологический комплекс [Monitoring evapotranspiration ... , 2018]. Комплекс предназначен для мониторинга суммарного испарения и параметров микроклимата сельскохозяйственного поля. Температура воздуха измерялась датчиком Honeywell HEL-712-U-0-12; влажность воздуха – Honeywell HИH-4602-C; атмосферное давление – Freescale Semiconductor MPXAZ4115A (высота расположения датчиков равна 2 м); радиометрическая температура поверхности расти-

тельности – датчиком Optris GmbH optris CT; радиационный баланс – Agrophysical Institute, Net Radiometer (высота 0,7 м от растительной поверхности); скорость ветра – H1M, Windgeschwindigkeitssensor (высота датчика скорости ветра  $z = 2$  м). Все датчики соединены с микроконтроллером, синхронные измерения собираются в базу данных с интервалом 90 с.

### Результаты и обсуждение

В таблице 3 приведены результаты статистической оценки расчета скрытого и явного потоков тепла с учетом стратификации приземного слоя воздуха и без учета, указаны следующие статистические показатели:  $RMSE$  – среднеквадратическое отклонение (Root Mean Square Error),  $Вт/м^2$ ;  $d_w$  – индекс согласия Вильмотта (Willmott's Index of Agreement);  $NSE$  – критерий Нэша – Сатклиффа (Nash-Sutcliffe efficiency);  $r$  – коэффициент корреляции Пирсона (Pearson correlation coefficient). На рисунке 1 даны диаграммы рассеяния составляющих энергетического баланса, измеренных кросс-ковариационным способом на поле кукурузы в штате Небраска [Suzyker, 2016] и рассчитанных с учетом стратификации.

Таблица 3

Результаты статистического анализа оценки скрытого, явного потоков тепла по данным кросс-ковариационных измерений в штате Небраска (США,  $41^{\circ}09'54''$  с. ш.,  $96^{\circ}28'36''$  з. д.) над полем кукурузы в период 2001–2005 гг.

Статистический показатель	Турбулентный поток тепла без учета стратификации, $Вт/м^2$	Турбулентный поток тепла с учетом стратификации, $Вт/м^2$	Скрытый поток тепла без учета стратификации, $Вт/м^2$	Скрытый поток тепла с учетом стратификации, $Вт/м^2$
$RMSE$ , $Вт/м^2$	102,4	53,3	102,6	68,7
$d_w$	0,76	0,88	0,91	0,96
$NSE$	-1,34	0,37	0,55	0,80
$r$	0,82	0,82	0,86	0,95

Статистический анализ показал, что рассчитанные с учетом стратификации значения скрытого и явного потоков тепла лучше согласуются с измеренными, чем без учета стратификации.

Для апробации метода были использованы данные полевых экспериментов на сельскохозяйственных полях Ленинградской области в период вегетации растений, измерения проводились в дневное время, когда радиационный баланс достигает максимальных значений. Были проведены эксперименты над посевами кукурузы, рапса и амаранта. Над полем кукурузы наблюдалась неустойчивая стратификация ( $L < 0$ ), над амарантом отмечалась стратификация, близкая к нейтральной ( $|L| \rightarrow \infty$ ), над полем рапса стратификация была устойчивой ( $L > 0$ ).

На рисунках 2–4 показаны графики изменения рассчитанных радиационного баланса, скрытого потока тепла, турбулентного потока тепла, потока тепла в почву для кукурузы, рапса и амаранта соответственно. Поле рапса было хорошо увлажнено и удобрено, в результате в день измерений над полем наблюдался оазисный эффект, турбулентный поток тепла в течение всего дня был отрицательный и направлен к подстилающей растительной по-

верхности. Скрытый поток тепла над полем рапса имеет высокие значения. Над участком амаранта выявлена стратификация, близкая к нейтральной, в результате турбулентный поток тепла имеет невысокие значения. В эксперименте над кукурузой разница температур между поверхностью растительности и воздухом постепенно увеличивалась к середине дня, что привело к увеличению явного потока тепла и снижению скрытого потока, наблюдалась неустойчивая стратификация приземного слоя воздуха. В эксперименте над кукурузой можно наблюдать, что приблизительно с 14 часов скрытый поток тепла равномерно уменьшается, а явный поток тепла возрастает, что говорит о том, что растение начало закрывать устьица, чтобы избежать потери влаги. Таким образом, определение отношения скрытого и явного потоков тепла в суточном ходе может служить индикатором полива для автоматизированных систем орошения.

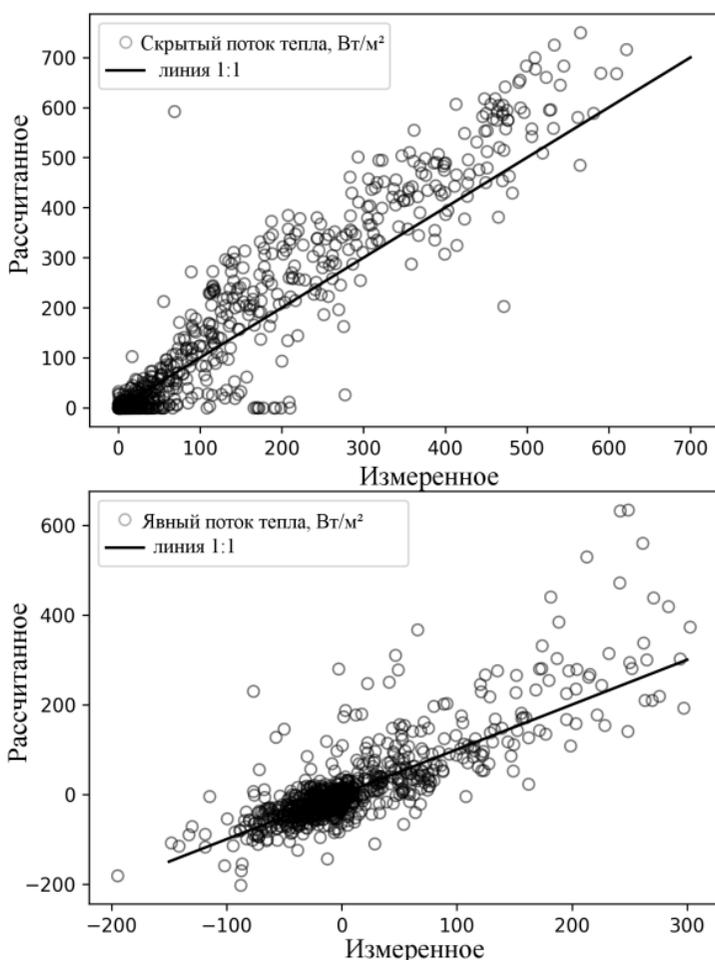


Рис. 1. Диаграмма рассеяния скрытого и явного потоков тепла над полем кукурузы в штате Небраска, измеренных кросс-ковариационным способом и рассчитанных с учетом стратификации

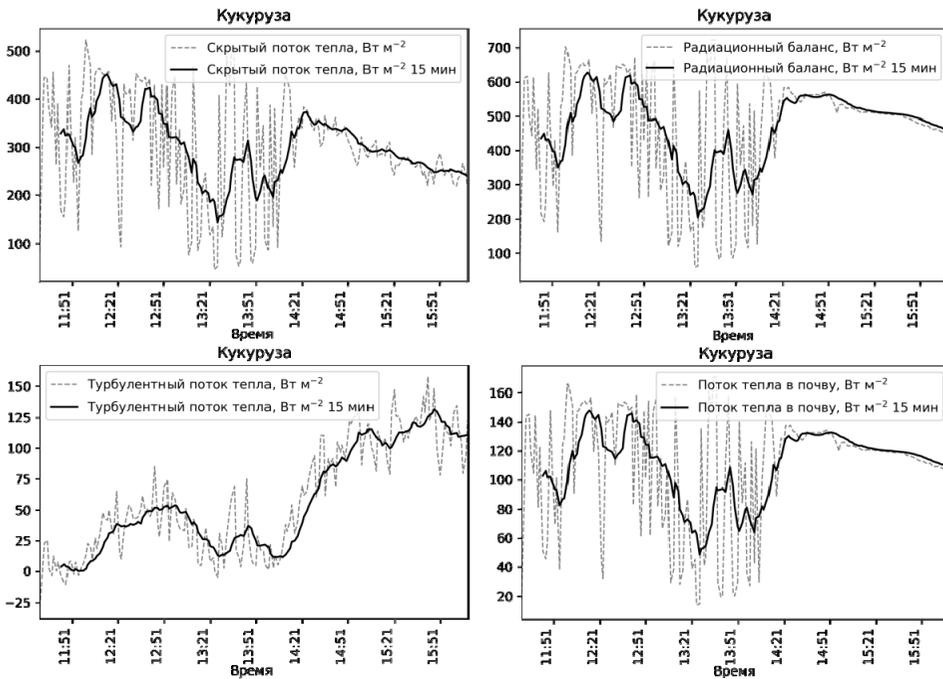


Рис. 2. График изменений рассчитанных потоков: скрытого потока тепла, радиационного баланса, турбулентного потока тепла, потока тепла в почву для кукурузы (пунктирная линия – ряд данных за 90 с; сплошная линия – скользящее среднее за 15 мин)

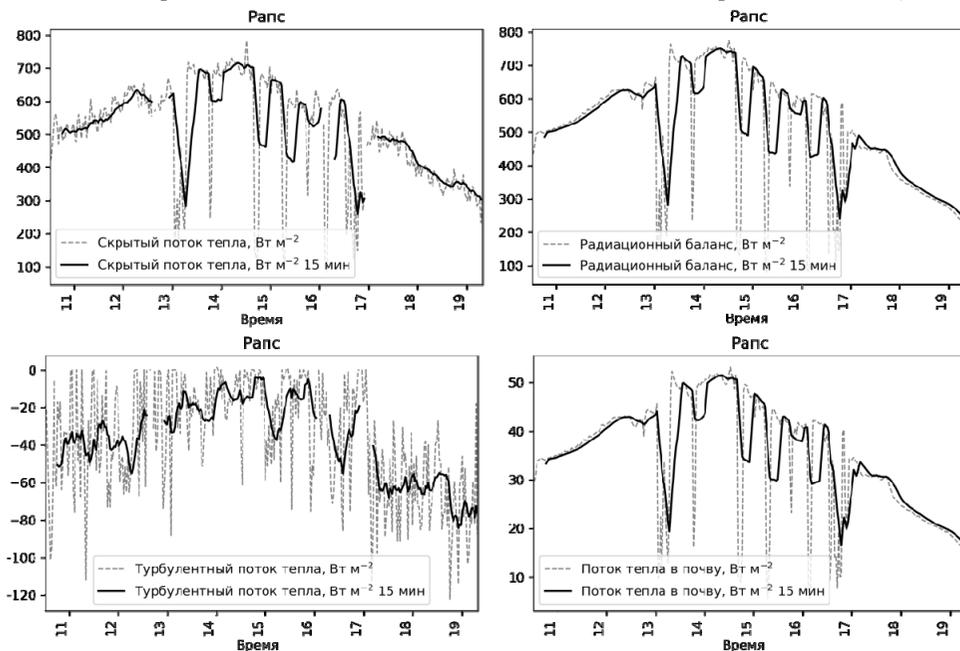


Рис. 3. График изменений рассчитанных потоков: скрытого потока тепла, радиационного баланса, турбулентного потока тепла, потока тепла в почву для рапса (пунктирная линия – ряд данных за 90 с; сплошная линия – скользящее среднее за 15 мин)

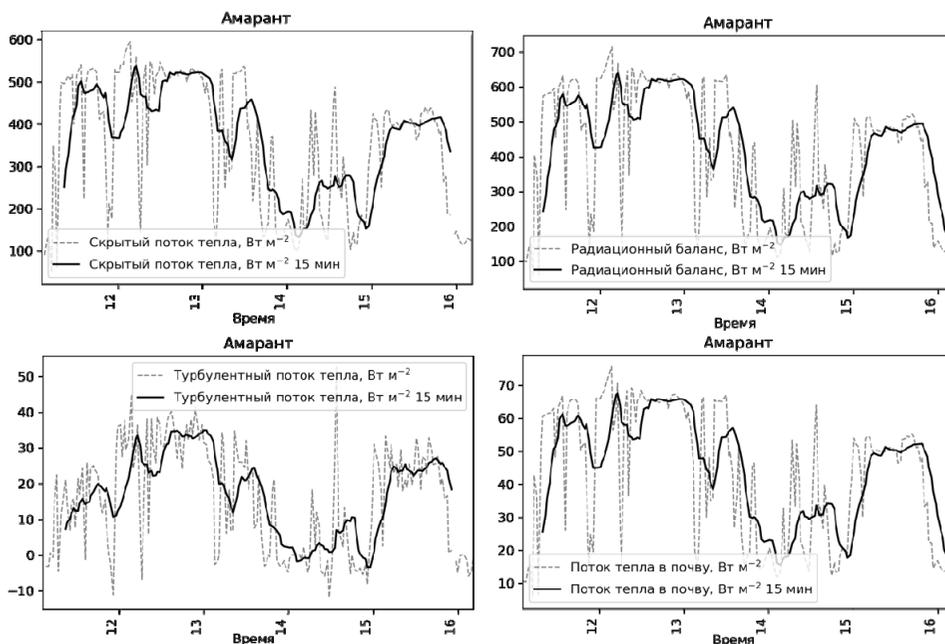


Рис. 4. График изменений рассчитанных потоков: скрытого потока тепла, радиационного баланса, турбулентного потока тепла, потока тепла в почву для амаранта (пунктирная линия – ряд данных за 90 с; сплошная линия – скользящее среднее за 15 мин)

## Заключение

Предложен метод автоматизированного расчета скрытого и явного потоков тепла в суточном ходе на основе уравнения энергетического баланса с учетом параметров подстилающей поверхности и стратификации приземного слоя атмосферы, позволяющий проводить мониторинг суммарного испарения.

Проведена валидация метода по данным кросс-ковариационных измерений на потоковой станции сети FluxNet Ne-1 (штат Небраска, США).

Автоматизированный расчет скрытого потока тепла в дневное время суток с учетом стратификации приземного слоя воздуха может быть использован в моделях энергомассообмена на подстилающей поверхности суши, в информационных технологиях управления водным режимом на посевах и для мониторинга за ростом и развитием посевов.

## Список литературы

- Братсерт У. Х. Испарение в атмосферу. Л. : Гидрометиздат, 1985. 352 с.  
 Будаговский А. И. Испарение почвенной влаги. М. : Наука, 1964. 242 с.  
 Доброхотов А. В. Определение пространственного распределения суммарной радиации в зависимости от типов и количества облачности с использованием спутниковых данных фактора мутности Линке и цифровой модели рельефа // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2018. Т. 23, № 4. С. 33–45.  
 Монин А. С., Обухов. А. М. Безразмерные характеристики в приземном слое атмосферы // Доклады АН СССР. 1953. Т. 93, № 2. С. 223–226.

*Монин А. С., Обухов. А. М.* Основные законы турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // Тр. Геофизического института Академии наук СССР. 1954. № 24(151). С. 163–187.

*Akylas E., Tombrou M.* Interpolation between Businger-Dyer formula and free convection forms: a revised approach // *Boundary-Layer Meteorology*. 2005. Vol. 115. P. 381–398.

*Allen R. G., Tasumi M., Trezza R.* Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model // *Journal of irrigation and drainage engineering*. 2007. Vol. 133, N 4. P. 380–394.

Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements / R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith. Rome, FAO Irrigation and Drainage Paper, 1998. N 56. 326 p.

FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities / D. Baldocchi [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2001. Vol. 82, N 11. P. 2415–2434.

*Beljaars, A. C. M., Holtstag, A. A. M.* Flux parameterization over land surfaces for atmospheric model // *Journal of Applied Meteorology*. 1991. Vol. 30. P. 327–341.

*Bowen I.* The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface // *Physics Review*. 1926. Vol. 27. P. 779–787.

*Burba G.* Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates. LI-COR Biosciences, 2013. 332 p.

Monitoring evapotranspiration in an agricultural field and determination of irrigation rates and dates by automated mobile field agrometeorological complex // A. E. Efimov, Yu. R. Sitdikova, A. V. Dobrokhотов, L. V. Kozyreva. *Water Resources*. 2018. Vol. 45, N 1. P. 133–137.

*Gavilán P., Berengena J.* Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment // *Irrigation Science*. 2007. Vol. 25, N 2. P. 127–140.

Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements / Sh. Liu, L. Lu, D. Mao, L. Jia // *Hydrol. Earth Syst. Sci*. 2007. Vol. 11. P. 769–783.

*Pagowski M.* An iterative solution of flux-profile relationships in the surface layer for regional model applications // *Atmospheric environment*. 2006. Vol. 40. P. 6892–6897.

*Paulson C. A.* The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer // *Journal of Applied Meteorology*. 1970. Vol. 9. P. 857–861.

Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes / P. J. Perez, F. Castellvi, M. Ibanez, J. I. Rosell // *Agricultural and Forest Meteorology*. 1999. Vol. 97, N 3. P. 141–150.

*Su Z.* The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes // *Hydrology and earth system sciences*. 2002. Vol. 6, N 1. P. 85–100.

*Suyker A.* AmeriFlux US-Ne1 Mead-irrigated continuous maize site. AmeriFlux. University of Nebraska-Lincoln, 2016.

*Vernof A., De Bruin H. A. R., Van Den Hurk J. J. M.* Some Practical Notes on the Parameter kB-1 for Sparse Vegetation // *Journal of Applied Meteorology*. 1997. Vol. 36. P. 560–572.

## Parameterization of the Latent and Sensible Heat Fluxes in a Stratified Atmospheric Surface Layer above the Vegetation Surface

L. V. Kozyreva, A. V. Dobrokhotov

*Agrophysical Research Institute, Saint-Petersburg, Russian Federation*

**Abstract.** In this paper the validation and approbation of the method for estimating the latent and sensible heat fluxes over the vegetation surface in the daytime were carried out. The effect of stratification of the surface air layer on the accuracy of the calculations was investigated. The method for calculating the latent heat flux is based on the energy balance equation and includes an estimation of the thermal stability parameters using the Monin-Obukhov length, which is estimated by the iteration method based on experimental data. Validation of calculations was carried out according to the eddy covariance measurements on a flux station located in the state of Nebraska (USA). This station is located on an agricultural field. The model efficiency index (Nash-Sutcliffe index) for the latent heat flux without stratification is 0.55, with a stratification of 0.80; Wilmott's index of agreement is 0.91 and 0.96; root mean square error is 102.6 W/m<sup>2</sup> and 68.7 W/m<sup>2</sup>, respectively. The model efficiency index (Nash-Sutcliffe index) for the sensible heat flux without stratification is -1.34, with a stratification of 0.37; Wilmott's index of agreement is 0.76 and 0.88; root mean square error is 102.4 W/m<sup>2</sup> and 53.3 W/m<sup>2</sup>, respectively. The method has been tested on amaranth, canola and corn in the Leningrad Region under various stratification conditions. An unstable stratification was observed over the corn field, a neutral stratification was observed above the amaranth field, and the stratification was stable over the canola field. An oasis effect was observed over the corn field, the crop surface temperature was lower than the air temperature, which led to negative values of sensible heat flux.

**Keywords:** latent heat flux, sensible heat flux, stratification, Monin-Obukhov length, parameterization.

**For citation:** Kozyreva L.V., Dobrokhotov A.V. Parameterization of the Latent and Sensible Heat Fluxes in a Stratified Atmospheric Surface Layer above the Vegetation Surface. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2019, vol. 30, pp. 26-37. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.30.26> (in Russian)

### References

- Bratsert U.Kh. *Isparenie v atmosferu*. Leningrad, Gidrometizdat, 1985, 352 p.
- Budagovskii A.I. *Isparenie pochvennoi vlagi*. Moscow, Nauka Publ., 1964, 242 s.
- Dobrokhotov A.V. Opredelenie prostranstvennogo raspredeleniya summarnoi radiatsii v zavisimosti ot tipov i kolichestva oblachnosti s ispolzovaniem sputnikovykh dannykh faktora mutnosti Linke i tsifrovoi modeli reliefa. *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologii)*, 2018, vol. 23, no. 4, pp. 33-45.
- Monin A.S., Obukhov A.M. Bezrazmernye kharakteristiki v prizemnom sloe atmosfery. *Doklady AN SSSR*, 1953, vol. 93, no. 2, pp. 223-226.
- Monin A.S., Obukhov A.M. Osnovnye zakony turbulentnogo peremeshivaniya v prizemnom sloe atmosfery. *Tr. Geofizicheskii institut Akademii nauk SSSR*, 1954, no. 24(151), pp.163-187.
- Akylas E., Tombrou M. Interpolation between Businger-Dyer formulat and free convection forms: a revised approach. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, vol. 115, pp. 381-398.
- Allen R. G., Tasumi M., Trezza R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 2007, vol. 133, no. 4, pp. 380-394.
- Baldocchi D., et al. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, vol. 82, no. 11, pp. 2415-2434.

- Beljaars, A. C. M., Holtstag, A. A. M. Flux parameterization over land surfaces for atmospheric model. *Journal of Applied Meteorology*, 1991, vol. 30, pp. 327-341.
- Bowen I. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physics Review*, 1926, vol. 27, pp. 779-787.
- Burba G. *Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates*. LI-COR Biosciences, 2013. 332 p.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Rome, FAO Irrigation and Drainage Paper No 56. 1998. 326 p.
- Gavilán P., Berengena J. Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. *Irrigation Science*, 2007, vol. 25, no. 2, pp. 127-140.
- Efimov A.E., Sitdikova Yu.R., Dobrokhotov A.V., Kozyreva L.V. Monitoring evapotranspiration in an agricultural field and determination of irrigation rates and dates by automated mobile field agrometeorological complex. *Water Resources*, 2018, vol. 45, no. 1, pp. 133-137.
- Liu Sh., Lu L., Mao D., Jia L. Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2007, vol. 11, pp. 769-783.
- Pagowski M. An iterative solution of flux-profile relationships in the surface layer for regional model applications. *Atmospheric environment*, 2006, vol. 40, pp. 6892-6897.
- Paulson C.A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *Journal of Applied Meteorology*, 1970, vol. 9, pp. 857-861.
- Perez P.J., Castelli F., Ibanez M., Rosell J.I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, vol. 97, no. 3, pp. 141-150.
- Su Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and earth system sciences*, 2002, vol. 6, no. 1, pp. 85-100.
- Suyker A. *AmeriFlux US-Ne1 Mead-irrigated continuous maize site*. AmeriFlux, University of Nebraska-Lincoln, 2016.
- Vernof A., De Bruin H.A.R., Van Den Hurk J.J.M. Some Practical Notes on the Parameter kB-1 for Sparse Vegetation. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, vol. 36, pp. 560-572.

**Козырева Людмила Владимировна**  
кандидат технических наук, ведущий  
научный сотрудник  
Агрофизический научно-исследовательский  
институт  
Россия, 195220, г. Санкт-Петербург,  
Гражданский пр., 14  
тел.: 8 (812) 534-13-24  
e-mail: [4ludak@gmail.com](mailto:4ludak@gmail.com)

**Kozyreva Lyudmila Vladimirovna**  
Candidate of Sciences (Technical), Leading  
Researcher  
Agrophysical Research Institute  
14, Grazhdansky Ave., Saint-Petersburg,  
195220, Russian Federation  
tel.: 8 (812) 534-13-24  
e-mail: [4ludak@gmail.com](mailto:4ludak@gmail.com)

**Доброхотов Алексей Вячеславович**  
научный сотрудник  
Агрофизический научно-исследовательский  
институт  
Россия, 195220, г. Санкт-Петербург,  
Гражданский пр., 14  
тел.: 8 (812) 534-13-24  
e-mail: [dobralexey@gmail.com](mailto:dobralexey@gmail.com)

**Dobrokhotov Aleksei Vyacheslavovich**  
Researcher  
Agrophysical Research Institute  
14, Grazhdansky Ave., Saint-Petersburg,  
195220, Russian Federation  
tel.: 8 (812) 534-13-24  
e-mail: [dobralexey@gmail.com](mailto:dobralexey@gmail.com)