

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПОЧВЫ С
КОМПЛЕКСНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЭНЕРГОМАССООБМЕНА В СИСТЕМЕ
«ПОЧВА – РАСТЕНИЕ – ПРИЗЕМНЫЙ СЛОЙ ВОЗДУХА»**

А. В. Доброхотов, Г. П. Романов, Л. В. Козырева
ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»
195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14
E-mail: 4ludak@gmail.com

Поступила в редакцию 06 декабря 2019 г., принята к печати 25 февраля 2020 г.

В работе исследуются комплексные показатели процессов энерго- и массообмена на сельскохозяйственном поле и их связь с потоком тепла и содержанием влаги в почве. Отношение Боуэна, часть энергии, затрачиваемой на испарение, и величина тепловой инерции были выбраны в качестве показателей, характеризующих испаряющую, теплоотдающую и тепло-аккумулятивную способность почв в энергетических процессах системы «почва – растение – приземный слой воздуха». Эксперименты по исследованию взаимосвязи выбранных показателей с температуропроводностью и объемной влажностью почвы были проведены в 2019 г. на сельскохозяйственном поле Менковской опытной станции с посевами вики и овса. Приведены данные о динамике изменения и результаты статистического анализа сопряженных тепловых, водных и энергетических показателей на сельскохозяйственном поле.

Ключевые слова: энергетический баланс, отношение Боуэна, тепловая инерция, часть энергии, затрачиваемой на испарение, коэффициент температуропроводности.

**STUDY OF INTERRELATION OF HYDROTHERMAL SOIL CONDITIONS WITH INTEGRATED
CHARACTERISTICS OF ENERGY AND MASS TRANSFER IN
«SOIL – PLANT – ATMOSPHERIC SURFACE LAYER» SYSTEM**

A. V. Dobrokhoto, G. P. Romanov, L. V. Kozyreva
Agrophysical Research Institute
14, Grazhdanskiy pr., St. Petersburg, Russia, 195220
E-mail: 4ludak@gmail.com

The paper presents the results of studying complex parameters of energy and mass transfer processes of an agricultural field and their relationship with the heat flux and moisture content in the soil. The Bowen ratio, evaporation fraction and the value of thermal inertia were chosen as indicators characterizing the evaporating, heat-emitting and heat-accumulative capacity of soils in the energy processes of the system «soil – plant – atmospheric surface layer». Experiments to study the interrelation of the selected indicators with the thermal diffusivity and volumetric soil moisture content were carried out in 2019 on the agricultural field of Menkovo experimental station sown with vetch and oats. The paper presents the data on the dynamics of change and the results of statistical analysis of conjugate heat, water and energy indicators of an agricultural field.

Keywords: energy balance, Bowen ratio, thermal inertia, evaporation fraction, thermal diffusion coefficient.

ВВЕДЕНИЕ

Между земной поверхностью и атмосферой постоянно происходит обмен энергией, движением и водой через турбулентные (H) и скрытые потоки тепла (LE). Скрытый поток тепла является важнейшим механизмом энерго- и массообмена между гидросферой, биосферой и атмосферой и играет критическую роль как в водном цикле, так и в энергетическом балансе (Song, 2012). Численные оценки турбулентных потоков в атмосфере важны для построения многих моделей прогнозирования урожая (Allen, 1998). Для нормального развития растений необходимо оптимальное сочетание свойств, процессов и режимов почв, а также параметров микроклимата сельскохозяйственного поля.

Суммарное испарение (физическое испарение с оголенной почвы и испарение с растительного

покрова) является комплексным информационным агрометеорологическим показателем. Данная величина зависит от суммы приходящей радиации, температуры, влажности и скорости приземного слоя воздуха, физических свойств почвы и биологических особенностей растений.

Воде принадлежит важная роль в почвообразовании: процессы выветривания, новообразования минералов, гумусообразования и химические реакции совершаются только в водной среде; формирование генетических горизонтов почвенного профиля и динамика протекающих в почве процессов также связаны с водой. Вода в почве выступает в качестве терморегулирующего фактора, определяющего в значительной степени тепловой баланс почвы и ее температурный режим. Основным фактором, влияющим на изменение тепловой инерции

почвы, является значительная тепловая инерция воды, обусловленная её высокой теплоёмкостью.

От теплового и водного режимов почв зависят начало и конец вегетационного периода, а также скорость поступления к корням питательных веществ. Температура почвы влияет на скорость поступления воды в корни растений, транспирацию и продуктивность растительности. Температурный режим почв регулирует численность микроорганизмов и их активность, минеральные преобразования, а также процессы разложения органических остатков и трансформации почвенного гумуса. Температура почв определяет фазовые переходы в системе «почва – почвенный раствор – почвенный воздух», процессы растворения солей, газов и скорость выветривания минералов. Таким образом, изучение тепловых свойств почв необходимо при детальных исследованиях всех процессов, протекающих в почвах, а также при количественных расчетах соле-, водо- и газопереносов.

Целью настоящей работы являлось исследование взаимосвязи энергетических показателей, зависящих от метеорологических условий, с комплексными почвенными характеристиками, влияющими на рост и развитие растений на сельскохозяйственном поле.

Новизна работы заключается в верификации алгоритмов полуэмпирических методов расчета выбранных показателей – части энергии, затраченной на испарение, отношения Боуэна, объемной влажности почвы в слое 0–5 см и тепловой инерции – с использованием в качестве входных данных результатов полевых измерений.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Содержание влаги в почве является параметром, сильно меняющимся во времени и пространстве, в особенности это касается поверхности почвы. S. I. Seneviratne с соавторами (2010) предложено рассматривать содержание влаги в верхнем 5-сантиметровом слое почвы и в корневой зоне (в слое ниже 5 см). Наиболее важными параметрами, влияющими на пространственную изменчивость влажности почвы, являются топография, особенности почвы, тип и густота растительности, глубина залегания грунтовых вод, количество осадков, солнечная радиация и другие метеорологические факторы. Ключевыми свойствами почвы, влияющими на концентрацию и пространственно-временное распределение в ней влаги, являются текстура почвы, органическая составляющая и пористость. Перенос и удержание влаги в почве в значительной степени зависят от её текстуры. Именно содержание влаги в почве является наиболее важным фактором, регулирующим испарение из неё. Структура почвы также может оказывать влияние на испарение (Wesseling, 2009). Дополнительно на скорость испарения влияет такой фактор, как цвет почвы, – более темные почвы имеют более низкое альbedo и отражают меньшее количество солнечной радиации, которая, в частности, расходуется на поток тепла в почву. Разный цвет почвы обусловлен различиями в химическом составе, от которого также зависит

способность почвы впитывать влагу. Увеличение температуры поверхности почвы может существенно изменить интенсивность испарения (Robinson, 2008).

При одинаковых условиях над поверхностью почвы различия в температурном режиме определяются её тепловыми свойствами. От тепловых свойств почвы зависит, как изменяется ее температура в процессе поглощения тепла деятельной поверхностью и его перераспределения в активном слое почвы. При поступлении одного и того же количества тепла изменение температуры почвы определяется ее теплоемкостью, а интенсивность внутрипочвенного переноса тепла – теплопроводностью (Воронин, 1986).

Для сопряженного исследования процессов энергомассообмена в системе «почва – растение – приземный слой воздуха» выбраны следующие показатели: тепловая инерция почвы, часть энергии, затраченной на испарение из оголенной почвы или с растительного покрова, отношение Боуэна (отношение реального испарения к турбулентному потоку), реальное суммарное испарение, транспирация. Далее приведены формулы расчета выбранных сопряженных показателей системы «почва – растение – приземный слой воздуха».

В качестве комплексного количественного показателя используется коэффициент теплоусвояемости солнечной энергии (тепловая инерция, ТИ) в 5-сантиметровом верхнем слое почвы (Вершинин, 1959). Данный показатель зависит от коэффициента теплопроводности (λ), коэффициента температуропроводности (k) и объемной теплоемкости почвы (C). Расчетные формулы для указанных величин приведены ниже:

$$k = \lambda / C; \text{ТИ} = C\sqrt{k}. \quad (1)$$

Объемная теплоемкость (C , Дж м⁻³К⁻¹) почвы зависит от объемных фракций минеральной части почвы (V_m), органического вещества (V_c), воды (V_w) и рассчитывается по формуле, предложенной D. A. De Friz (1968):

$$C = (1,94 \cdot V_m + 2,5 \cdot V_c + 4,19 \cdot V_w) \cdot 10^6. \quad (2)$$

Для расчета коэффициента температуропроводности выбран метод, предложенный И. Н. Русиным (Русин, 2014):

$$k = \frac{\frac{1}{2\Delta} \sum_{k=1}^{k=4} D_k \cdot [T_k(t+\Delta) - T_k(t-\Delta)]}{[T(t_i, 0) - T(t_i, h)] - \frac{h}{(H-h)} [T(t_i, h) - T(t_i, H)]}, \quad (3)$$

где H – наибольшая глубина наблюдений; h – глубина наблюдений, примерно равная $H/2$; T – температура за разные сроки наблюдений и на разных глубинах; D_k – интеграл по глубинам (формула (4)), вычисленный при помощи интерполяционного полинома и построения матрицы по глубинам:

$$D_k = \frac{hH^2}{H-h} \sum_{i=0}^{i=4} \frac{m_{i,k} H^i}{(i+1)(i+2)} \left[1 - \left(\frac{h}{H} \right)^{i+1} \right]. \quad (4)$$

Реальное суммарное испарение (ET_r) определяется как остаточный член из уравнения теплового баланса (Allen, 1998):

$$\lambda ET_r = R_n - H - G, \quad (5)$$

где λ – скрытая теплота парообразования; R_n – радиационный баланс; H – турбулентный поток тепла; G – поток тепла в почву. Турбулентный поток тепла определяется с учетом стратификации приземного слоя воздуха и аэродинамических характеристик подстилающей поверхности. Поток тепла в почву рассчитывается через проективное покрытие. Метод расчета суммарного испарения подробно изложен в работе А. Е. Ефимова с соавт. (2018). Основными составляющими теплового баланса сельскохозяйственного поля являются потоки тепла и водяного пара (скрытое и явное тепло). Их отношение представляет собой отношение Боуэна:

$$\beta = \frac{H}{\lambda ET_r}. \quad (6)$$

В настоящем исследовании потоки тепла и влаги рассчитывались при помощи полуэмпирических методов с учетом стратификации приземного слоя воздуха. Среди альтернативных методов, основанных на отношениях потоков и наиболее широко используемых в моделировании энергетического баланса, выделяется методика расчета такого показателя, как доля энергии, затрачиваемой на испарение (EF). Отношение EF выражено зависимостью (Shuttleworth, 1989):

$$EF = \frac{\lambda ET_r}{R_n - G}. \quad (7)$$

Потоки тепла и влаги рассчитывались при помощи полуэмпирических методов с учетом стратификации приземного слоя воздуха и применением теории Мони́на–Обухова (Ефимов и др., 2018). Процессы энерго- и массообмена в системе «почва – растение – приземный слой воздуха» являются основными процессами, определяющими особенности сельскохозяйственного поля. Сопряженные временные ряды показателей состояния системы (ПРА) позволят разработать методику рационального и эффективного управления тепловлагообеспеченностью.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперимент проводился на поле с посевами вики и овса, расположенном в пос. Меньково (59°42'N, 30°03'E) на дерново-подзолистых почвах. Измерения агрометеорологических характеристик на поле выполнялись с помощью автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса (АМПАК), разработанного в Агрофизическом институте. В процессе проведения эксперимента с интервалом в 90 секунд измерялись следующие физические величины: аэродинамическая температура (датчик HEL-705-U-1-12-C2, Honeywell International, Inc.) и влажность воздуха (датчик H1H-4602-C, Honeywell International, Inc.) на двух высотах, атмосферное давление (MPX4115AP, Honeywell International, Inc.), скорость ветра на высоте 2 м (датчик Windgeschwindigkeitssensor, HIM), радиометрическая температура над почвой и растительностью (датчик Optris GmbH, CT LT), радиационный баланс поверхности (балансомер, АФИ), суммарная радиация (пиранометр Янишевского), объемная влажность почвы на глубине 5 см (датчик Decagon Devices 10HS) и температура почвы на разных глубинах (датчик HEL-705-U-1-12-C2, Honeywell International, Inc.). Осуществлялась синхронная автоматическая передача результатов измерений в базу данных прибора (АМПАК). Также выполнялись необходимые измерения фенологических и физиологических характеристик посева (проективное покрытие, высота растений и т. д.) с помощью ручных приборов. Результаты полевых экспериментов передавались в информационную базу данных.

Дополнительное увлажнение 5-сантиметрового слоя почвы на поле с вики и овсом было проведено 19.08.2019. Полив осуществлялся каждые 30 минут. Одновременно проводились измерения объёмной влажности при помощи прибора АМПАК (датчиков, указанных выше). Результаты измерений объёмной влажности, градиентов температур почвы и метеопараметры осреднялись за периоды изменения объёмной влажности в пределах $0,001 \text{ м}^3 \text{ м}^{-3}$. Часть энергии, затраченной на испарение, рассчитывалась по формуле (7). На рис. 1 представлены результаты исследования зависимости объёмной влажности почвы (θ) от энергии, затрачиваемой на испарение (EF), а также от отношения Боуэна (β). На рис. 1–2 приведены диаграммы рассеяния, регрессионные зависимости и статистические оценки зависимости для оголенной почвы и растительного покрова.

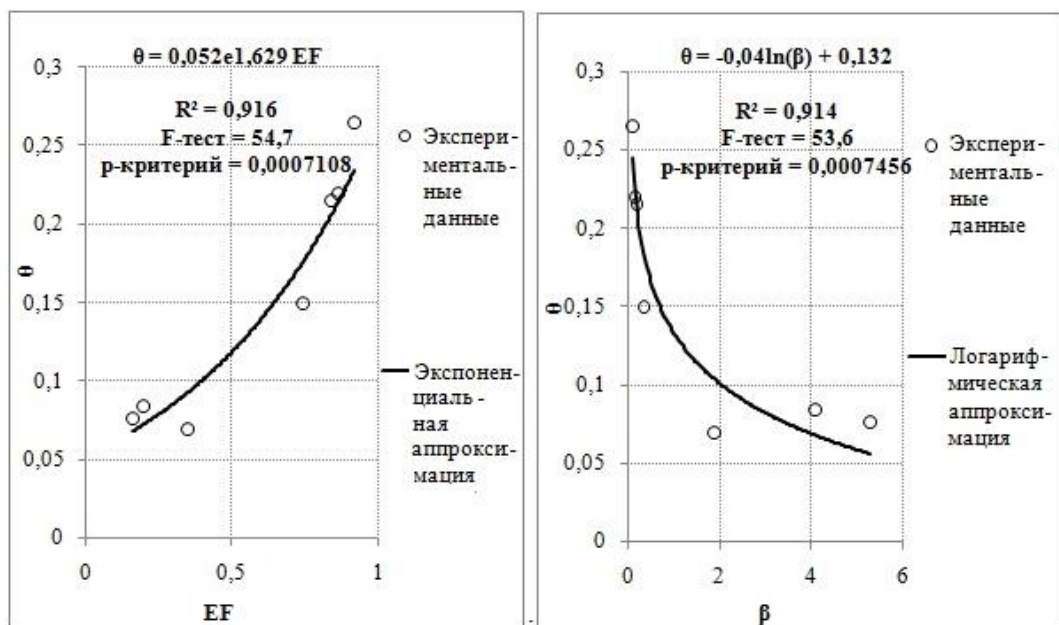


Рис. 1. Диаграмма рассеяния и регрессионная зависимость между частью энергии, затрачиваемой на испарение (EF , [-]), отношением Боуэна (β , [-]) и объёмной влажностью (θ , [$\text{м}^3 \text{м}^{-3}$]) для оголенной почвы; статистические оценки зависимости

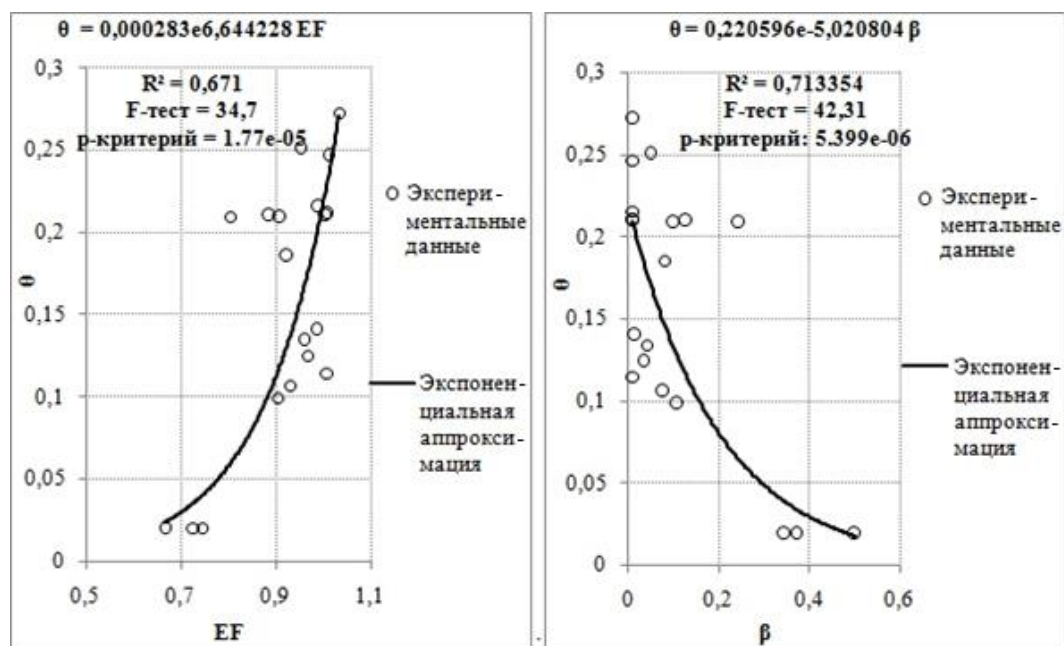


Рис. 2. Диаграмма рассеяния и регрессионная зависимость между частью энергии, затрачиваемой на испарение (EF , [-]), отношением Боуэна (β , [-]) и объёмной влажностью почвы (θ , [$\text{м}^3 \text{м}^{-3}$]) для растительного покрова; статистические оценки зависимости

EF изменяется в пределах от 0,0 до 1,0. Если величина равна нулю, то это означает, что поверхность очень сухая и эвапотранспирация не происходит. С другой стороны, величина EF , равная 1,0, означает, что поверхность очень влажная и эвапотранспирация является максимально возможной. EF представляет собой своего рода индикатор того, сколько доступной энергии затрачивается на эвапотранспирацию, т. е., иными словами, на транспирацию с растительности и испарение с почвы. Очевидно, что пока доступная влага имеется в наличии, энергия затрачивается на испарение, а когда влаги не останется, доступная энергия будет направлена на процесс турбулентного

теплообмена H , а EF будет приближаться к 0 (Shuttleworth, 1989).

Для оценки влияния и взаимосвязи процессов переноса тепла и влаги в почве и приземном слое воздуха в условиях наличия и отсутствия растительности использовались отношение Боуэна (формула (6)) и отношение части энергии, затраченной на испарение (EF) (формула (7)). На рис. 1 и 2 показаны регрессионные зависимости отношения Боуэна (β) и части энергии (EF) от объёмной влажности почвы (θ) в слое 0–5 см по данным эксперимента за 19.08.2019.

Данные экспериментов за 22.05.19, 03.07.19, 16.07.19 и 19.08.18 были использованы для расчета коэффициентов температуропроводности по формулам (1–5) в соответствии с методикой, предложенной И. Н. Русиным. При расчете использовались автоматически синхронно измеренные показатели температуры почвы на уровнях 5 см, 15 см и 20 см, а также радиационной температуры поверхности и объёмной влажности почвы в слое 0–5 см. Объёмная и органическая фракции дерново-подзолистой почвы д. Меньково в расчетах объёмной теплоёмкости почвы принимались равными 0,951% и 4,9% соответственно, расчет проводился по формуле (2). Тепловая инерция рассчитывалась по формуле (1). Измерения необходимых параметров проводились 22 мая, 3, 16 июля и 19 августа в дневное время в течение нескольких часов. Проективные покрытия экспериментальных поверхностей равны 0; 0,6; 0,7; 0,75 соответственно.

На рис. 3 отображены изменения коэффициентов температуропроводности в зависимости от факторов окружающей среды: агрометеорологических параметров, влажности

почвы и проективного покрытия. 19 августа был проведен полив водой с интервалом в 30 минут, в результате чего объёмная влажность в верхнем 5-сантиметровом слое увеличивалась от 0 до 0,3 ($\text{м}^3 \text{м}^{-3}$) и коэффициент температуропроводности изменился соответственно. Однако проведенный анализ материалов современных исследований позволяет сделать вывод о том, что для определения взаимосвязи коэффициента температуропроводности с показателями энерго- и массообмена необходимо использовать современные модели расчета.

Тепловая инерция во всех четырех экспериментах (рис. 3) изменялась под влиянием комплексного взаимодействия выбранных параметров, определяющих объёмную теплоемкость и коэффициент температуропроводности.

На рис. 4 показаны основные тенденции изменения сопряженных энергетических, тепловых и водных показателей. Влажность почвы увеличивалась, а отношение Боуэна уменьшалось. Динамика коэффициента температуропроводности и тепловой инерции не противоречит законам теплообмена в почве.

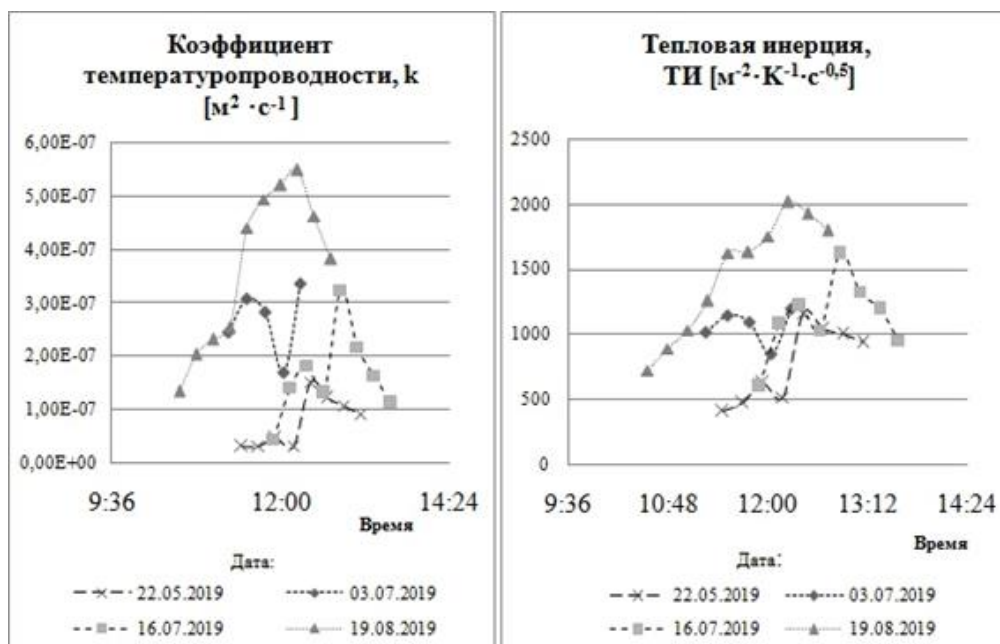


Рис. 3. Динамика коэффициентов температуропроводности (k , $[\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}]$) и тепловой инерции (ТИ, $[\text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{с}^{-0.5}]$) за каждый день эксперимента

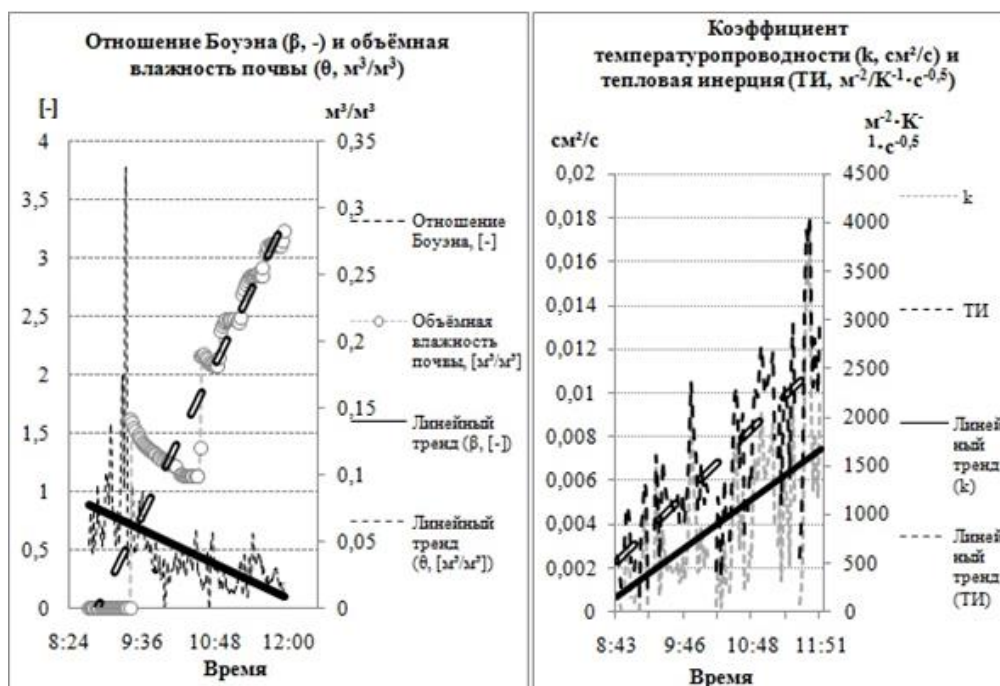


Рис. 4. Временные ряды отношения Боуэна (β , [-]), объёмной влажности почвы (θ , $\text{м}^3 \text{м}^{-3}$) в слое 0–5 см, коэффициента температуропроводности (k , $\text{м}^2 \text{с}^{-1}$) и тепловой инерции (ТИ, $\text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{с}^{-0.5}$) за 19.08.2019

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате полевых экспериментов, проведенных на поле Меньковской опытной станции с посевами вики и овса, исследованы взаимосвязи отношения Боуэна и части энергии, затрачиваемой на испарение, с объёмной влажностью почвы в условиях наличия и отсутствия растительности. Представлены кривые динамики коэффициента температуропроводности и тепловой инерции в период проведения экспериментов. Показаны временные ряды изменений отношения Боуэна, объёмной влажности почвы, коэффициента температуропроводности, тепловой инерции, а также линейные тренды изменений за период проведения эксперимента. Для дальнейшего исследования необходимо определить методы и модели расчета выбранных сопряженных показателей, которые позволят автоматизировать их мониторинг и пространственное распределение в локальном и региональном масштабах с заданными временными шагами (минуты, часы, сутки, вегетационный период). Выбранный подход позволит исследовать взаимосвязь гидротермических условий почвы с комплексными характеристиками энергомассообмена в системе «почва – растение – приземный слой воздуха».

Список литературы

- Воронин А. Д. Основы физики почв. М.: Изд-во МГУ, 1986. 324 с.
- Вершинин П. В., Мельникова М. К., Мичурин Б. Н., Мошков Б. С., Поясов Н. П., Чудновский А. Ф. Основы агрофизики. М.: Изд-во МГУ, 1959. 903 с.
- Де Фриз Д. А. Тепловые свойства почв // Физика среды обитания растений. Л.: Гидрометеиздат, 1968. С. 191–214.
- Ефимов А. Е., Ситдикова Ю. Р., Доброхотов А. В., Козырева Л. В. Мониторинг эвапотранспирации на сельскохозяйственном поле, определение норм и сроков полива автоматизированным мобильным полевым агрометеорологическим комплексом // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 1. С. 100–105.
- Русин И. Н. Оценка потока тепла в почву при произвольном размещении по глубине почвенных термометров // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2014. № 570. С. 149–62.
- Чудновский А. Ф. Теплофизика почв. М.: Изд-во МГУ, 1976. 368 с.
- Allen R. G., Pereira, Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements- FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: Fao, 1998, 300 p.
- Famiglietti J. S., Rudnicki J. W., Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas // Journal of Hydrology, 1998, t. 210, no. 1–4, pp. 259–281.
- Kuruku Y., Sanli F. B., Esetlili M. T., Bolca M., Goksel C. Contribution of SAR images to determination of surface moisture on the Menemen Plain, Turkey // International Journal of Remote Sensing, 2009, t. 30, no. 7, pp. 1805–1817.
- Robinson D. A., Campbell C. S., Hopmans J. W., Hornbuckle B. K., Jones S. B., Knight R., Ogden F., Selker J., Wendroth O. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review // Vadose Zone Journal, 2008, t. 7, no. 1, pp. 358–389.

- Song Y. Wang, K. Yang, M. Ma, X. Li, Z. Zhang, and X. Wang. A revised surface resistance parameterisation for estimating latent heat flux from remotely sensed data // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, t. 17, pp. 76–84.
- Seneviratne S. I. Corti, Davin E. L., Hirschi M., Jaeger E. B., Lehner I., Orlowsky B., Teuling A. J. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review // *Earth-Science Reviews*, 2010, t. 99, no. 3–4, pp. 125–161.
- Sugita M., Brutsaert W. Daily evaporation over a region from lower boundary layer profiles measured with radiosondes // *Water Resources Research*, 1991, t. 27, no. 5, pp. 747–752.
- Shuttleworth W. J., Gurney R. J., Hsu A. Y., Ormsby J. P. FIFE: the variation in energy partition at surface flux sites // *IAHS Publ.*, 1989, t. 186, no. 6, pp. 523–534.
- Wesseling J. G., Stoof C. R., Ritsema C. J., Oostindie K., Dekker L. W. The effect of soil texture and organic amendment on the hydrological behavior of coarse-textured soils // *Soil use and management*, 2009, t. 25, no. 3, pp. 274–283.

References

- Voronin A. D. *Osnovy fiziki pochv* [Fundamentals of soil physics]. Moscow.: Moscow University Publishing, 1986, 324 p.
- Vershinin P. V., Mel'nikova M. K., Michurin B. N., Moshkov B. S., Poyasov N. P., Chudnovskiy A. F. *Osnovy agrofiziki* [Fundamentals of agrophysics]. Moscow.: Moscow University Publishing, 1959, 903 p.
- De Friz D. A. *Teplovyie svoystva pochv. Fizika sredy obitaniya rasteniy* [Thermal properties of soils. Physics of plant habitat]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968, pp. 191–214.
- Efimov A. E., Sitdikova Iu. R., Dobrokhotov A. V., Kozyreva L. V. Monitoring evapotranspiratsii na sel'skokhozyaystvennom pole, opredeleniye norm i srokov poliva avtomatizirovannym mobil'nyim polevym agrometeorologicheskim kompleksom [Monitoring evapotranspiration in an agricultural field and determination of irrigation rates and dates by automated mobile field agrometeorological complex]. *Vodnyye resursy*, 2018, v. 45, no. 1, pp. 100–105.
- Rusin I. N. Otsenka potoka tepla v pochvu pri proizvod'nom razmeschenii po glubine pochvennykh termometrov [Assessment of heat flux into the soil with arbitrary placement along the depth of soil thermometers]. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A. I. Voyeykova*, 2014, no. 570, pp. 149–162.
- Chudnovskiy A. F. *Teplofizika pochv* [Soil thermophysics]. Moscow: Moscow University Publishing, 1976, 368 p.
- Allen R. G., Pereira, Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: Fao, 1998, 300 p.
- Famiglietti J. S., Rudnicki J. W., Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas // *Journal of Hydrology*, 1998, t. 210, no. 1–4, pp. 259–281.
- Kuruku Y., Sanli F. B., Esetlili M. T., Bolca M., Goksel C. Contribution of SAR images to determination of surface moisture on the Menemen Plain, Turkey // *International Journal of Remote Sensing*, 2009, t. 30, no. 7, pp. 1805–1817.
- Robinson D. A., Campbell C. S., Hopmans J. W., Hornbuckle B. K., Jones S. B., Knight R., Ogden F., Selker J., Wendroth O. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review // *Vadose Zone Journal*, 2008, t. 7, no. 1, pp. 358–389.
- Song Y. Wang, K. Yang, M. Ma, X. Li, Z. Zhang, and X. Wang. A revised surface resistance parameterisation for estimating latent heat flux from remotely sensed data // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, t. 17, pp. 76–84.
- Seneviratne S. I. Corti, Davin E. L., Hirschi M., Jaeger E. B., Lehner I., Orlowsky B., Teuling A. J. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review // *Earth-Science Reviews*, 2010, t. 99, no. 3–4, pp. 125–161.
- Sugita M., Brutsaert W. Daily evaporation over a region from lower boundary layer profiles measured with radiosondes // *Water Resources Research*, 1991, t. 27, no. 5, pp. 747–752.
- Shuttleworth W. J., Gurney R. J., Hsu A. Y., Ormsby J. P. FIFE: the variation in energy partition at surface flux sites // *IAHS Publ.*, 1989, t. 186, no. 6, pp. 523–534.
- Wesseling J. G., Stoof C. R., Ritsema C. J., Oostindie K., Dekker L. W. The effect of soil texture and organic amendment on the hydrological behaviour of coarse-textured soils // *Soil use and management*, 2009, t. 25, no. 3, pp. 274–283.