

## Оценка фазовых соотношений между тепловыми потоками и температурой земной поверхности в суточном цикле по результатам мониторинга на ОГМС “Верхнее Дуброво”

Д. Ю. Демежко, А. А. Горностаева, А. Н. Антипин

Институт геофизики УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, e-mail: ddem54@inbox.ru

Поступила в редакцию 06.07.2021 г., принята к печати 04.10.2021 г.

**Объект исследований.** Фазовые соотношения между тепловыми потоками и температурой земной поверхности в суточном цикле. **Методы.** Экспериментальные исследования – актинометрические наблюдения, мониторинг теплового потока через поверхности (грунта и искусственного слоя) и температуры поверхностей (грунта и искусственного слоя) на Объединенной гидрометеорологической станции (ОГМС) “Верхнее Дуброво” в 2020 г. **Результаты и выводы.** Изменения теплового потока через поверхности происходят синхронно с изменениями суммарной солнечной радиации у земной поверхности, которая, в свою очередь, синхронна с изменениями инсоляции на верхней границе атмосферы. Максимумы всех этих тепловых потоков наблюдаются в солнечный полдень. Температурная реакция отстает от них на величину, определяемую тепловой неоднородностью грунта. Ранее предложенная нами модель температурного отклика земной поверхности на изменение внешнего радиационного воздействия в настоящем исследовании развита на случай теплофизически неоднородного полупространства. Для простейшего случая неоднородности (наличия контрастного по тепловым свойствам верхнего слоя) приведено и исследовано аналитическое выражение. Если теплопроводность пород верхнего слоя ниже теплопроводности подстилающих пород, то фазовый сдвиг между вариациями теплового потока и температурным откликом земной поверхности уменьшается от значения, характерного для поверхности однородного полупространства ( $45^\circ$ ). Исследования грунта площадки ОГМС “Верхнее Дуброво” позволили построить теплофизический разрез и верифицировать модель по экспериментальным данным. Погрешности теоретических оценок в основном не превышают погрешности оценки фазы при 10-минутной дискретности отсчетов. **Практическое применение.** Полученные результаты могут найти применение в климатических (в том числе палеоклиматических) и экологических исследованиях, при изучении теплообмена на искусственных покрытиях городов и их роли в формировании городских островов тепла.

**Ключевые слова:** температура земной поверхности, инсоляция, солнечная радиация, суточный цикл, тепловой поток через поверхность, фазовый сдвиг

### Источник финансирования

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-05-00058 а – разработка модели, программного обеспечения, проведение теплофизических исследований на ОГМС “Верхнее Дуброво”, проведение расчетов, анализ актинометрических данных и обобщение результатов эксперимента) и госбюджетной темы НИР № 0394-2018-0002 (температурный мониторинг на ОГМС “Верхнее Дуброво”)

## An assessment of phase relationships between heat fluxes and ground surface temperatures in a diurnal cycle based on monitoring studies at the *Verkhnee Dubrovo* meteorological station

Dmitry Yu. Demezhko, Anastasiya A. Gornostaeva, Aleksandr N. Antipin

Yu.P. Bulashevich Institute of Geophysics, UB RAS, 100 Amundsena st., Ekaterinburg 620110, Russia,  
e-mail: ddem54@inbox.ru

Received 06.07.2021, accepted 04.10.2021

**Research subject.** The relationships between heat fluxes and ground surface temperatures in a diurnal cycle. **Methods.** Experimental studies, including actinometric observations and monitoring of surface temperatures and surface heat fluxes for

**Для цитирования:** Демежко Д.Ю., Горностаева А.А., Антипин А.Н. (2022) Оценка фазовых соотношений между тепловыми потоками и температурой земной поверхности в суточном цикле по результатам мониторинга на ОГМС “Верхнее Дуброво”. *Литосфера*, 22(2), 239–250. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-2-239-250>

**For citation:** Demezhko D.Yu., Gornostaeva A.A., Antipin A.N. (2022) An assessment of phase relationships between heat fluxes and ground surface temperatures in a diurnal cycle based on monitoring studies at the *Verkhnee Dubrovo* meteorological station. *Lithosphere (Russia)*, 22(2), 239–250. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-2-239-250>

a soil and an artificial layer, were performed at the *Verkhnee Dubrovo* meteorological station in 2020. *Results and conclusion.* The surface heat flux varies synchronously both with the total solar radiation near the earth's surface and insolation at the upper boundary of the atmosphere. Maximal values of these heat fluxes are observed at the solar noon. The temperature response lags behind them by the time interval determined by the soil's thermal heterogeneity. In this study, we extend our model of the ground surface temperature response to external radiative forcing, which was developed earlier, to the case of a thermal inhomogeneous half-space. An analytical expression for the simplest case of inhomogeneity (the presence of an upper layer with thermal properties different from those of the underlying rocks) is given and investigated. If the upper layer demonstrates a reduced thermal conductivity, the phase shift between the heat flux and the temperature response decreases in comparison with the value for a homogeneous half-space ( $45^\circ$ ). The soil studies conducted at the *Verkhnee Dubrovo* meteorological station allowed us to construct a thermophysical section and to verify the previously developed model using experimental data. The errors of theoretical estimates, in general, do not exceed those of the phase estimate at a 10-minute sampling rate. *Implementation.* The obtained results can be applied when conducting climatic (including palaeoclimatic) and environmental studies, as well as when investigating heat exchange processes on artificial urban surfaces and their role in the formation of urban heat islands.

**Keywords:** *ground surface temperature, insolation, solar radiation, diurnal cycle, heat flux, phase shift*

#### Funding information

*The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-05-00058 – Development of a model, software, thermophysical measurements in Verkhnee Dubrovo, analysis of actinometric data and generalization of the experimental results) and the state budget research theme No. 0394-2018-0002 (temperature monitoring at Verkhnee Dubrovo meteorological station)*

#### Acknowledgements

The authors are grateful to I.A. Rogovsky, V.A. Tyrtysnikov, and A.V. Korobov (Ural Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring) for their assistance in carrying out temperature monitoring at the *Verkhnee Dubrovo* site and for providing actinometry data.

## ВВЕДЕНИЕ

Исследования теплового баланса на земной поверхности и, в частности, фазовых соотношений между изменениями тепловых потоков и температуры имеют практическое приложение в различных областях. В работе (Горностаева и др., 2019) нами был сформулирован новый подход к орбитальной настройке (орбитальному тюнингу) датировок палеоклиматических реконструкций. В его основе лежат следующие положения.

1. Изменения теплового потока через земную поверхность происходят синхронно с изменениями солнечной радиации на внешней границе атмосферы (внешнего радиационного воздействия).

2. В соответствии с моделью кондуктивного теплообмена, изменения температуры земной поверхности отстают от изменений потока. Для описываемых суммой синусоидальных функций колебаний теплового потока и в условиях теплофизически однородного полупространства для каждой гармоники температурное отставание составит  $45^\circ$  ( $1/8$  периода).

3. Эти соотношения универсальны, т. е. справедливы для любых периодов колебаний внешнего воздействия – от долей суток до орбитальных (десетки и сотни тыс. лет).

Метод реализуется следующим образом. По теоретическим данным об изменениях инсоляции (см., например, Berger, Loutre, 1991; Laskar et al., 1993, 2004; Fedorov, 2015), обусловленных колебаниями параметров земной орбиты (прецессии земной оси – 26 тыс. лет, наклона земной оси к плоско-

сти эклиптики – 41 тыс. лет, эксцентриситета орбиты – 100 тыс. лет), в рамках модели теплообмена на поверхности однородного полупространства рассчитываются так называемые квазитетпературные кривые. Палеотемпературные хронологии, требующие корректировки, синхронизируются именно с квазитетпературными (а не с инсоляционными, как в каноническом применении орбитального тюнинга) кривыми.

Оценки запаздывания температурного отклика, рассчитанные с помощью предложенной модели для орбитальных циклов, неплохо согласуются с эмпирическими данными, основанными на анализе независимых временных маркеров (Hays et al., 1976; Waelbroeck et al., 1995; Kutzbach et al., 2008). Значительно большие неопределенности наблюдаются при рассмотрении короткопериодных колебаний – годовых и суточных. В качестве причины, определяющей различия в фазовых сдвигах в годовом цикле, рассматривают различия в теплоемкости водных масс и суши (Douglass et al., 2004), а в суточном цикле – эвапотранспирацию (Sun et al., 2013; Renner et al., 2019).

В настоящей статье мы развиваем идею универсальности ранее предложенной модели, а отклонения фазового сдвига от уровня  $45^\circ$  объясняем влиянием теплофизических неоднородностей в верхней части разреза. Мы также проводим верификацию модели для суточного цикла по данным температурного и актинометрического мониторинга, проведенного на метеостанции “Верхнее Дуброво” (Свердловская область).

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Нестационарное одномерное уравнение теплопроводности в теплофизически однородном полу-пространстве имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2},$$

где  $T$  – температура,  $t$  – время,  $z$  – глубина,  $a$  – температуропроводность.

Соотношение между изменениями температуры и теплового потока описывается законом Фурье:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dz},$$

где  $\lambda$  – теплопроводность.

Если колебания температуры поверхности полу-пространства происходят по синусоидальному закону

$$T(0,t) = T_0 + A \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} t + \varphi\right),$$

где  $T_0$  – среднее значение температуры земной поверхности,  $A$  – амплитуда температурных колебаний,  $\tau$  – период колебаний,  $\varphi$  – фаза, то изменения теплового потока через земную поверхность будут происходить так же – по синусоидальному закону, но опережая по фазе температурные колебания (Горностаева, 2014; Demezhko, Gornostaeva, 2015):

$$q(0,t) = AE \sqrt{\frac{2\pi}{\tau}} \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} t + \varphi + \frac{\pi}{4}\right) = E \sqrt{\frac{2\pi}{\tau}} T(0,t + \frac{\tau}{8}).$$

Здесь  $E$  – тепловая активность пород, связанная с теплопроводностью  $\lambda$ , плотностью  $\rho$  и удельной теплоемкостью  $C$  пород:  $E = (\lambda \rho C)^{1/2}$ . Изменения теплового потока опережают изменения температуры на 1/8 периода колебаний ( $45^\circ$ ), что ранее было отмечено У. Беннетом с коллегами (Bennet et al., 2008). В абсолютном выражении этот сдвиг, естественно, будет зависеть от периода колебаний: 3 ч – для суточного цикла, 46 сут – для годового, 12.5 тыс. лет – для ледниково-межледниковых колебаний плейстоцена.

В реальности условие однородности выполняется не всегда. Часто верхняя часть разреза представляет собой растительный покров, почву, сухие рыхлые песчаные отложения, коры выветривания. Их тепловые характеристики (в первую очередь теплопроводность и тепловая активность) могут быть существенно меньше тепловых характеристик нижележащих увлажненных и более плотных пород.

Распределение температуры в двуслойной среде с мощностью верхнего слоя  $h$  будет описываться системой одномерных нестационарных уравнений теплопроводности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial t} &= a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2}, & 0 \leq z \leq h, \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} &= a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2}, & z > h. \end{aligned}$$

Если температура поверхности покрывающего слоя  $T_1(0,t)$  – гармоническая функция времени  $T(0,t) = T_0 + A_0 \sin(\omega t)$ , а на границе раздела  $z = h$  выполняются условия идеального теплового сопряжения, то колебания температуры в верхнем слое на глубине  $z$  в установившемся режиме будут также описываться гармоническим законом (Демежко, 2001):  $T(z,t) = A_1(z) \sin(\omega t - \psi_1(z))$ , где  $A_1$  и  $\psi_1$  – амплитуда и сдвиг фазы колебаний в верхнем слое, описывающиеся соотношениями

$$A_1(z) = A_0 \exp(-k_1 z) \sqrt{\frac{1 - 2p_z \cos u_z + p_z^2}{1 - 2p_0 \cos u_0 + p_0^2}}, \quad 0 \leq z \leq h,$$

$$\psi_1(z) = -k_1 z + \arctg \frac{p_z \sin u_z}{1 - p_z \cos u_z} - \arctg \frac{p_0 \sin u_0}{1 - p_0 \cos u_0},$$

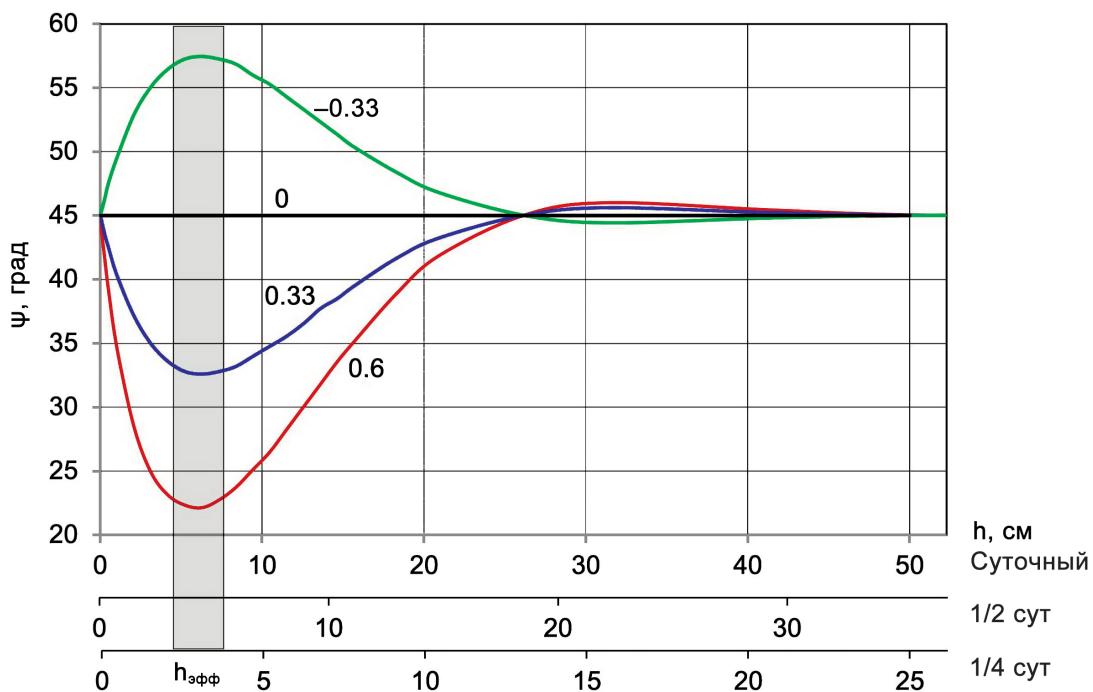
где  $p_z = \varepsilon \exp(-u_z)$ ,  $u_z = 2k_1(h-z)$ ,  $p_0 = \varepsilon \exp(-u_0)$ ,  $u_0 = 2k_1h$ ,  $k = \sqrt{\omega/2a}$ ,

$$\varepsilon = \frac{1 - E_1 / E_2}{1 + E_1 / E_2} \quad \text{– тепловой контраст двух сред,}$$

$E_1 = \sqrt{\lambda_1 \rho_1 C_1} = \lambda_1 / \sqrt{a_1}$ ,  $E_2 = \sqrt{\lambda_2 \rho_2 C_2} = \lambda_2 / \sqrt{a_2}$  – тепловые активности (тепловые инерции). Тепловой поток через земную поверхность  $q(t) = \lambda_1 \frac{dT(z,t)}{dz} \Big|_{z=0}$ .

На рис. 1 приведены зависимости фазового сдвига между колебаниями теплового потока через земную поверхность и температуры поверхности от мощности верхнего слоя  $h$  и теплового контраста слоев  $\varepsilon$  для трех периодов колебаний:  $\tau = 1$ , 0.5 и 0.25 сут. Если верхний слой имеет более низкие тепловые характеристики по сравнению с нижним ( $\varepsilon > 0$ ), то фазовый сдвиг уменьшается относительно сдвига, определяемого моделью однородной среды ( $\psi_1 < 45^\circ$ ). Величина этого уменьшения определяется тепловым контрастом сред  $\varepsilon$  и мощностью слоя  $h$ . Максимальный эффект наблюдается при  $h_{\text{эфф}} \approx 0.05 L$ , где  $L = 2\pi/k$  – длина волны. Так, для суточной волны  $L = 1$  м (при  $a = 1 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ) максимальное уменьшение сдвига фазы будет наблюдаться при  $h_{\text{эфф}} = 5$  см, для полусуточной  $h_{\text{эфф}} = 3.7$  см, для четвертьсуточной  $h_{\text{эфф}} = 2.6$  см. При увеличении периода колебаний в  $m$  раз мощность слоя, вызывающего максимальные искажения фазового сдвига, увеличивается в  $\sqrt{m}$ . Слишком тонкий слой ( $h < 0.5 \times 10^{-3} L$ ) и, напротив, слишком мощный ( $h > 0.5 L$ ) не оказывают влияния на фазовый сдвиг, и он, как в простейшей модели, остается равным  $45^\circ$ .

Если верхний слой обладает более высокими тепловыми характеристиками ( $\varepsilon < 0$ ), то фазовый сдвиг будет возрастать ( $\psi > 45^\circ$ ). Такую ситуацию сложно представить существующей в естественных условиях, но она может встречаться в случае искусственных городских покрытий, например, если бетонная или металлическая плита лежит на гравийном основании.



**Рис. 1.** Зависимости фазового сдвига между колебаниями теплового потока через земную поверхность и температуры поверхности от мощности верхнего слоя  $h$  и теплового контраста двух сред  $\varepsilon$  (шифр кривых).

**Fig. 1.** Dependences of the phase shift between the fluctuations of the heat flux through the ground surface and the surface temperature on the thickness of the upper layer  $h$  and the thermal contrast of the two media  $\varepsilon$  (code of the curves).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования для оценки фазовых соотношений между потоками тепла и температурой земной поверхности и верификации описанной выше модели проводились в июле–августе 2020 г. на площадке Объединенной гидрометеорологической станции (ОГМС) “Верхнее Дуброво” ( $56^{\circ}45'00''$ Н,  $61^{\circ}02'39''$ Е). Внешний (солнечный) тепловой поток изучался по данным аттинометрических наблюдений. Исследования теплового потока через поверхность и температуры поверхности проводились на двух объектах: естественном грунте и грунте с искусственным низкотеплопроводным верхним слоем.

Предполагалось, что распределение теплопроводности в естественном грунте будет существенно зависеть от режима увлажнения. За время наблюдений осадки на площадке ОГМС выпадали весьма неравномерно. Мы выделили два характерных периода: сухой (09.07.2020–22.07.2020), в течение которого выпало 4 мм осадков (в среднем 0.3 мм/сут), и влажный (07.08.2020–22.08.2020) с суммарным количеством осадков 111 мм, среднесуточным – 6.9 мм. Дальнейший анализ был проведен раздельно для каждого из этих периодов (рис. 2).

В качестве искусственного слоя был использован пенопластовый блок  $190 \times 240 \times 68$  мм, установленный бровень с поверхностью площадки. Его толщина, близкая к  $h_{\text{эфф}}$  для суточных колебаний, и аномально низкая теплопроводность ( $\lambda = 0.05$  Вт/(м·К)) обеспечили максимальное уменьшение фазового сдвига, прогнозируемое моделью.

### Измерения теплопроводности и влажности грунта

Для обоснования теплофизической модели были проведены измерения теплопроводности и влажности образца грунта площадки ОГМС “Верхнее Дуброво”. Площадка сложена бурыми суглинистыми почвами и покрыта периодически скашивающей травянистой растительностью. Мощность дернового слоя не превышает 10 см, ниже, примерно до глубины 20 см, залегает темный суглинок с примесью органики, затем – светлый суглинок без видимых признаков органического вещества.

Образец грунта с ненарушенной структурой и естественной влажностью (характерной для влажного периода) был отобран в цилиндрический пластиковый контейнер диаметром 128 мм, высотой 270 мм. Отдельно из интервала 30–35 см взята проба неструктурированного суглинка. Изме-



Рис. 2. Распределение часовых сумм осадков на ОГМС “Верхнее Дуброво” летом 2020 г.

Fig. 2. Distribution of hourly precipitation at the *Verkhneye Dubrovo* meteorological station in the summer of 2020.

рения проводились через отверстия в стенках контейнера по нескольким неперекрывающимся профилям. Теплопроводность измерялась зондовым устройством МИТ-1 по ГОСТ 30256-94, влажность – диэлькометрическим зондовым влагометром ВИМС-2.21 (<http://www.interpibor.ru>) (рис. 3). Образец, соответствующий условиям сухого периода, был получен из исходного путем его высушивания с поверхности в течение 4 сут тепловым потоком  $\approx 200$  Вт/м<sup>2</sup>, создаваемым лампой накаливания с рефлектором.

Вертикальные распределения теплопроводности и влажности грунта приведены на рис. 3. В верхней дерновой части разреза теплопроводность минимальна – около 0.8 Вт/(м·К) для сухого и 1.1 Вт/(м·К) для влажного периода. Ниже расположена 5-сантиметровая переходная область, в пределах которой теплопроводность возрастает до 2.3 Вт/(м·К), оставаясь затем примерно постоянной. Таким образом, в суточном теплообороте мы можем рассматривать теплофизический разрез как двухслойный с низкотеплопроводным верхним слоем. На основе полученных данных были сформированы теплофизические модели, использованные для теоретических оценок фазовых соотношений (табл. 1).

В течение влажного периода содержание влаги варьирует от 20 до 30 мас. % с минимумом в средней части (10–20 см). Эти значения соответствуют наименьшей влагоемкости суглинков, или так называемой полевой влагоемкости, – максимальному количеству влаги, удерживаемой в капиллярно-подвешенном состоянии (Ревут, 1972). В сухой период содержание влаги с глубиной возрастает от 2 до 25%. Тепловые свойства изученного разреза определяются в первую очередь содержанием ор-

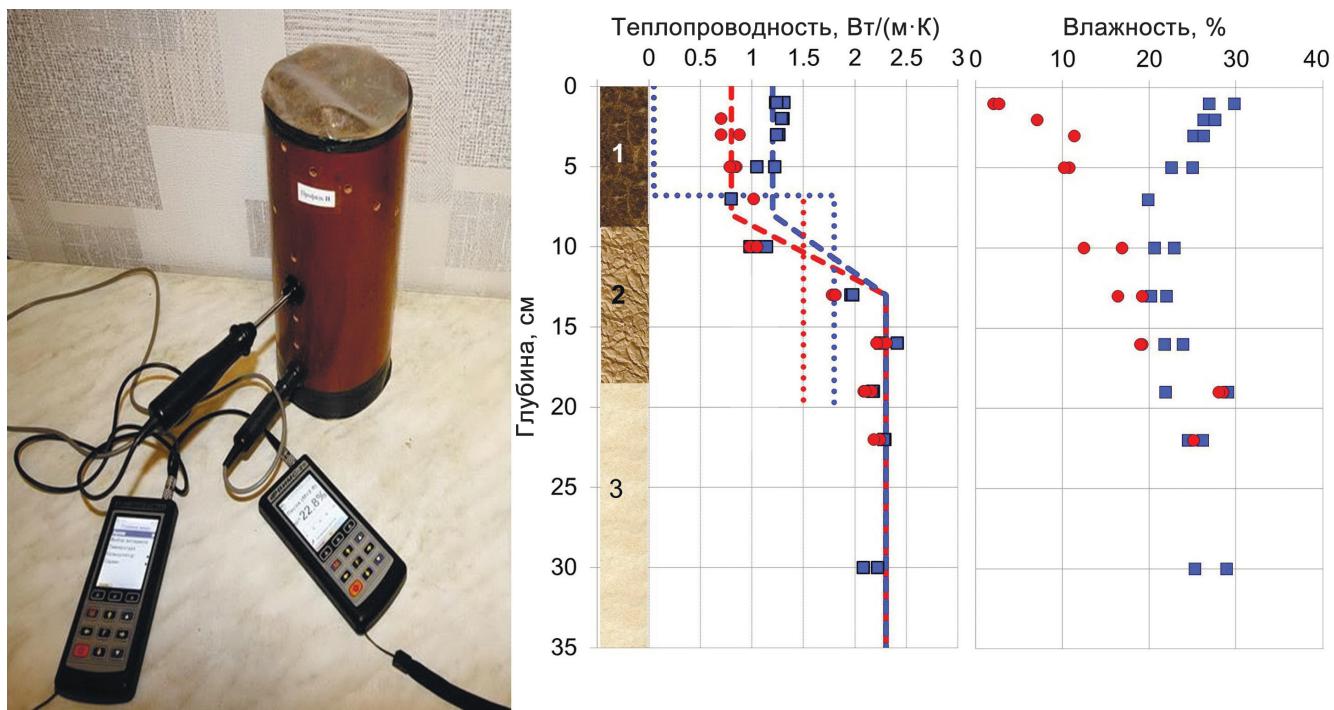
ганики, что ранее отмечалось и другими исследователями (Abu-Hamdeh, Reeder, 2000; и др.). Однако в пределах дернового слоя (верхние 8 см) теплопроводность почти линейно зависит от влажности  $W$ :  $\lambda = 0.036W + 0.31$  ( $W = 2$ –30%,  $R = 0.91$ ) (рис. 4). Для суглинка (19–30 см) такая зависимость отсутствует ( $R = -0.33$ ). Для разреза в целом корреляция теплопроводности и влажности слабая ( $R = 0.70$ ).

### Мониторинг температуры почвы

Температурный мониторинг почвы на участке актинометрии проводился с помощью автономного цифрового 8-канального регистратора температуры (АИТ), разработанного в ИНГГ СО РАН (Казанцев, Дучков, 2008). В качестве датчиков температуры применялись термисторы B57861-S 103-F40, 10 кОм, откалиброванные с точностью 0.005°C с помощью сухоблочного калибратора Fluke-9171. Четыре датчика температуры в герметичных медных трубках были установлены непосредственно в почве с помощью пластины из оргстекла на глубинах 1, 2, 3, 4 см от поверхности, четыре других – на тех же расстояниях в пенопластовом блоке (рис. 5). Периодичность опроса составляла 10 мин.

### Актинометрические наблюдения

ОГМС “Верхнее Дуброво” оснащена автоматизированным актинометрическим комплексом (ААК) Kipp&Zonen (рис. 6), позволяющим измерять прямую солнечную радиацию (S), рассеянную радиацию (D), суммарную радиацию (Q), отраженную радиацию (R), длинноволновую приходящую ( $E_d$ ) и уходящую ( $E_u$ ) радиацию, ультрафиолетовую



**Рис. 3.** Измерения теплопроводности и влажности на образце грунта с площадки “Верхнее Дуброво” (слева) и результаты измерений для сухого (красные кружки) и влажного (синие прямоугольники) периодов.

Ломаные линии – модели двухслойной среды для естественного грунта (пунктир) и при наличии искусственного низкотеплопроводного включения (пенопласт) (точки). Параметры моделей приведены в табл. 1. Цифрами на колонке обозначены: 1 – дерновый слой, 2 – суглинок с примесью органики, 3 – чистый суглинок.

**Fig. 3.** Measurements of thermal conductivity and moisture content on a soil sample from the *Verkhnee Dubrovo* site (left) and measurement results for dry (red circles) and wet (blue rectangles) periods.

Боломые линии – модели двухслойной среды для естественного грунта (пунктир) и при наличии искусственного низкотеплопроводного включения (пенопласт) (точки). Параметры моделей приведены в Табл. 1. Цифрами на колонке обозначены: 1 – дерновый слой, 2 – суглинок с примесью органики, 3 – чистый суглинок.

**Таблица 1.** Измеренные фазовые сдвиги температурных колебаний относительно колебаний теплового потока через земную поверхность и их теоретические оценки

**Table 1.** Measured phase shifts of temperature variations relative to the variations of a ground surface heat flux and their theoretical estimates

Период наблюдений	Условия измерений	Параметры расчета теор. сдвигов	Фазовый сдвиг измер./теор., град.	
			24-час. период	12-час. период
09.07.2020– 22.07.2020 (сухой период)	Грунт	Верх. слой: $h = 8 \text{ см}$ , $\lambda = 0.8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , $a = 0.5 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; ниж. слой: $\lambda = 2.3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , $a = 0.5 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , $\varepsilon = 0.48$	30.7/31.3	38.0/37.5
	Пенопласт	Верх. слой: $h = 6.8 \text{ см}$ , $\lambda = 0.05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , $a = 1.6 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; ниж. слой: $\lambda = 1.5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , $a = 0.5 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , $\varepsilon = 0.95$	13.6/5.8	12.2/9.3
07.08.2020– 22.08.2020 (влажный период)	Грунт	Верх. слой: $h = 8 \text{ см}$ , $\lambda = 1.1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , $a = 0.5 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; ниж. слой: $\lambda = 2.3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , $a = 0.5 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , $\varepsilon = 0.35$	32.3/35.0	44.2/39.5
	Пенопласт	Верх. слой: $h = 6.8 \text{ см}$ , $\lambda = 0.05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , $a = 1.6 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; ниж. слой: $\lambda = 1.8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , $a = 0.5 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , $\varepsilon = 0.97$	12.3/5.5	11.9/9.0

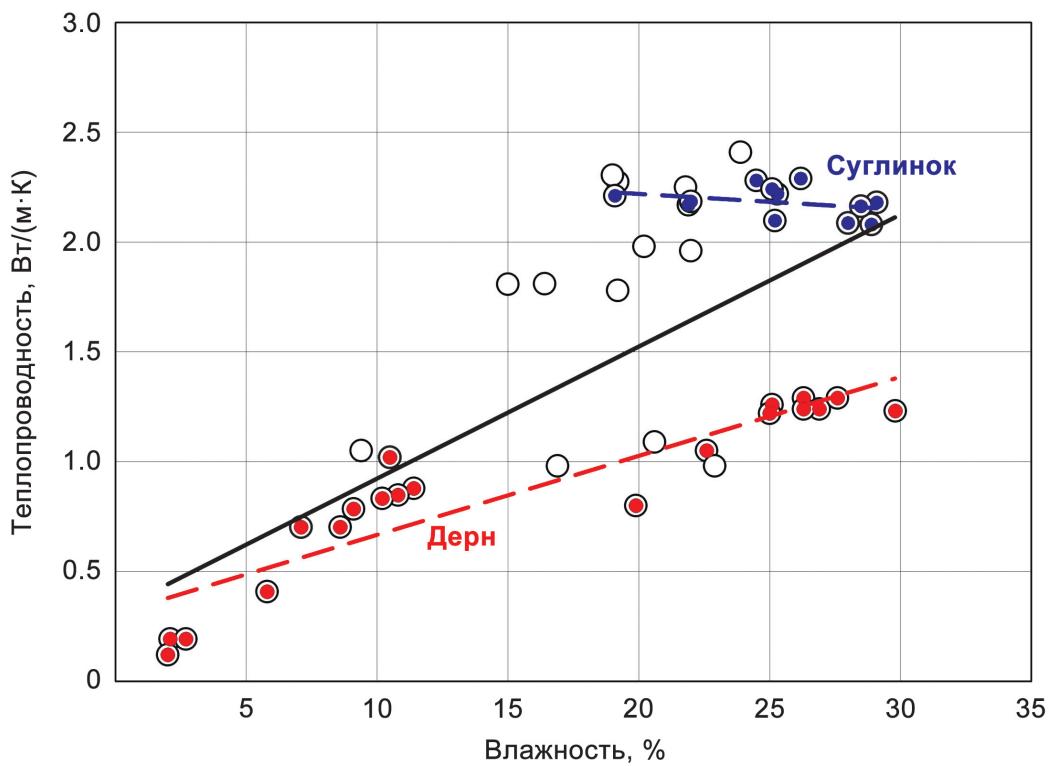


Рис. 4. Зависимость теплопроводности грунта от влажности дернового слоя (0–8 см, красные кружки), суглинка без органики (19–30 см, синие кружки), всего разреза (0–30 см, пустые кружки).

Прямые – линейные аппроксимации.

Fig. 4. The dependence of the soil's thermal conductivity on the moisture content of the turf layer (0–8 cm, red circles), loam without organic matter (19–30 cm, blue circles), the entire section (0–30 cm, empty circles).

Straight lines are linear approximations.

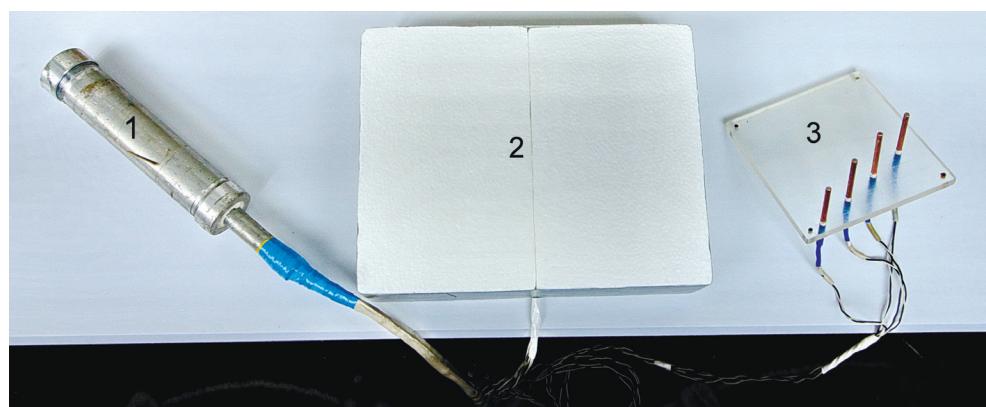


Рис. 5. Система температурного мониторинга почвы.

1 – регистратор АИТ, 2 – пенопластовый блок с датчиками, 3 – почвенные датчики.

Fig. 5. Temperature monitoring system.

1 – AIT recorder, 2 – polystyrene foam block with sensors, 3 – soil sensors.



Рис. 6. Автоматизированный актинометрический комплекс (ААК) Kipp&Zonen на ОГМС “Верхнее Дуброво”.

Fig. 6. Solar Monitoring Station Kipp & Zonen at Verkhnee Dubrovo meteorological station.

радиацию в спектральных интервалах 280–315 нм (UV A) и 315–400 нм (UV B).

В нашем исследовании используются лишь данные минутного и часового осреднения суммарной солнечной радиации  $Q = S + D$ . Суточные изменения солнечной радиации, усредненные отдельно за сухой и влажный периоды, приведены на рис. 7 (красные кривые). Аппроксимация кривых параболами позволяет найти максимум солнечной радиации. Он наблюдается в 12 ч 53 мин (сухой период) и 13 ч 03 мин местного времени (влажный период), т. е. примерно в истинный солнечный полдень (для В. Дуброво момент солнечного полдня в июле–августе наступает в период от 12 ч 56 мин до 13 ч 02 мин местного времени – <http://www.solar-noon.com>). Таким образом, изменения солнечной радиации на верхней границе атмосферы и у дневной поверхности происходят синхронно. Максимальное значение суммарной солнечной радиации составляет 700 Вт/м<sup>2</sup> в сухой период и 340 Вт/м<sup>2</sup> – во влажный.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 7 приведены кривые суточного хода потока суммарной солнечной радиации, потока тепла через поверхность почвы, низкотеплопроводного включения и температуры поверхностей. Тепловой поток через почву и пенопластовый блок рассчитывался согласно закону Фурье:  $q = -\lambda \cdot \Delta T / \Delta z$ , где  $\lambda$  – теплопроводность среды,  $\Delta T$  – изменение температуры на интервале соседних датчиков  $\Delta z$  (1 см). Все суточные кривые рассчитывались усреднением отдельно за сухой и влажный периоды. Изменения теплового потока через поверхности происходят синхронно с изменениями суммарной солнечной радиации, а вариации температуры заметно отстают. В дневное время тепловой поток через поверхность почвы направлен вниз и достигает 350 Вт/м<sup>2</sup> в сухой период и 60 Вт/м<sup>2</sup> – во влажный. После захода солнца тепловой поток направлен вверх, достигая –62 и –66 Вт/м<sup>2</sup> соответственно. Потоки через поверхность пенопластового блока значительно меньше: +12, –5 Вт/м<sup>2</sup> для сухого и +4, –3 Вт/м<sup>2</sup> для влажного периодов. Последнее, вероятно, связано с высоким альбедо пенопласта.

В амплитудных спектрах исследуемых параметров наиболее четко проявляется суточная и полу-суточная гармоники (рис. 8). Разности фаз основных гармоник колебаний температуры относительно теплового потока приведены в табл. 1 и показаны на диаграммах в полярных координатах (рис. 9). Фаза параметра  $q$  принята равной нулю.

Измеренное отставание температурного отклика при наличии низкотеплопроводного верхнего слоя ожидаемо оказалось менее 45°. На естественной поверхности грунта отставания в 24- и 12-часовом циклах составили соответственно 31 и 38° (тепловой контраст  $\epsilon = 0.48$ ) в сухой и 32 и 44° ( $\epsilon = 0.35$ ) во влажный периоды. Различия сдвигов для двух периодов объясняются различием тепловых контрастов: в сухой период первым теряет влагу верхний слой, увеличивая тепловой контраст и уменьшая фазовый сдвиг. На поверхности пенопластового включения, обладающего наибольшим тепловым контрастом по отношению к никележащему слою грунта ( $\epsilon = 0.95$ –0.97), фазовый сдвиг минимален – 12–13.6°.

Рассмотрим, как полученные экспериментальные данные количественно согласуются с теоретической моделью. Для этого аппроксимируем реальные разрезы двухслойной средой с теплофизическими характеристиками, соответствующими измеренным (см. ломаные линии на рис. 3). Принятые в моделях характеристики приведены в табл. 1. Теплопроводность пенопласта марки ПСБ-С ( $\lambda = 0.05$  Вт/(м·К)) была измерена прибором МИТ-1, температуропроводность вычислена по данным о плотности  $\rho = 2.1$  кг/м<sup>3</sup> и удельной теплоемкости

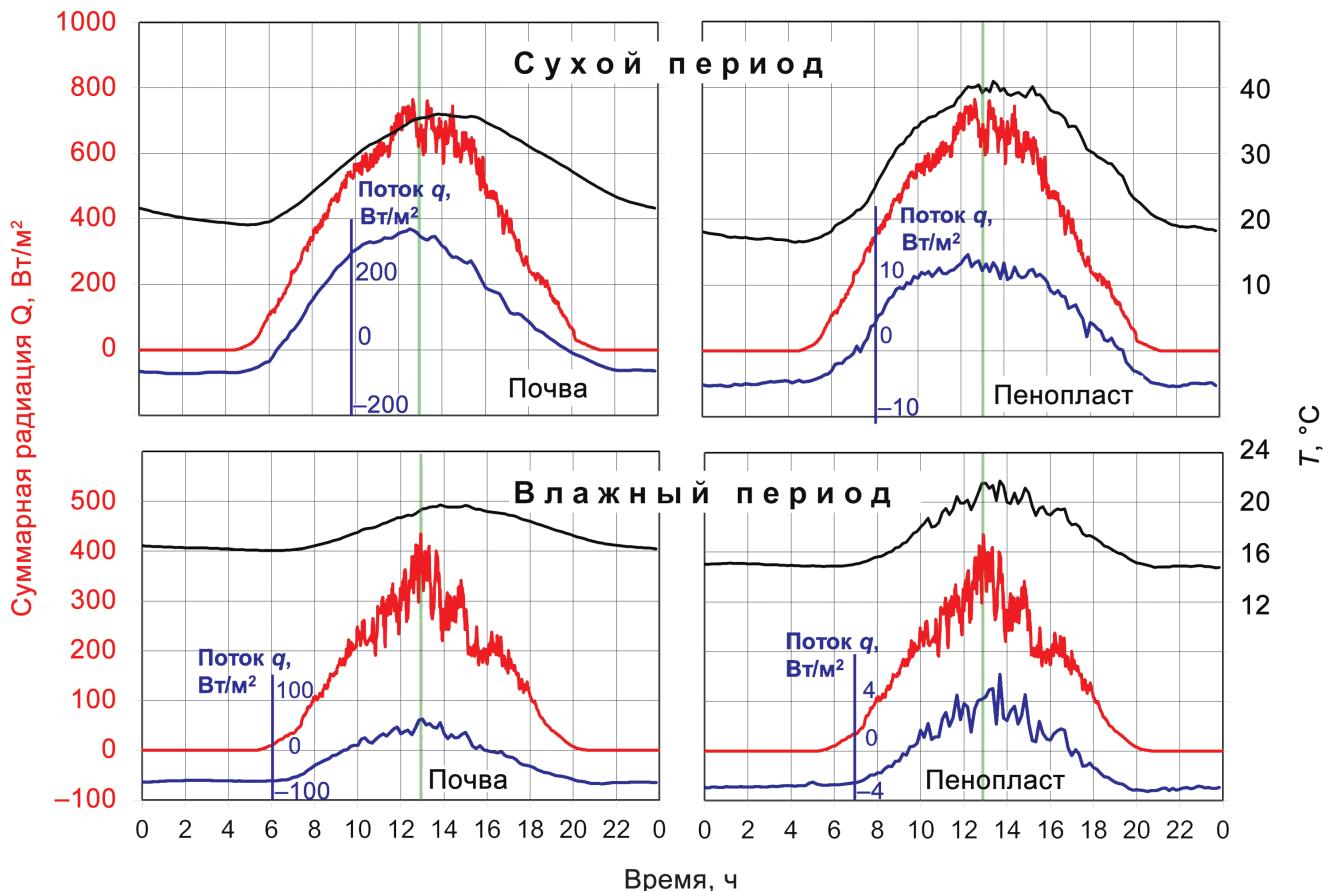


Рис. 7. Суточные изменения суммарной солнечной радиации (красные кривые), теплового потока через поверхность (синие) и температуры поверхности (черные), усредненные за сухой и влажный периоды.

Вертикальными зелеными линиями обозначен солнечный полдень. Время местное.

Fig. 7. Diurnal variation of global solar radiation (red curves), ground surface heat flux (blue) and surface temperature (black), averaged over dry and wet periods.

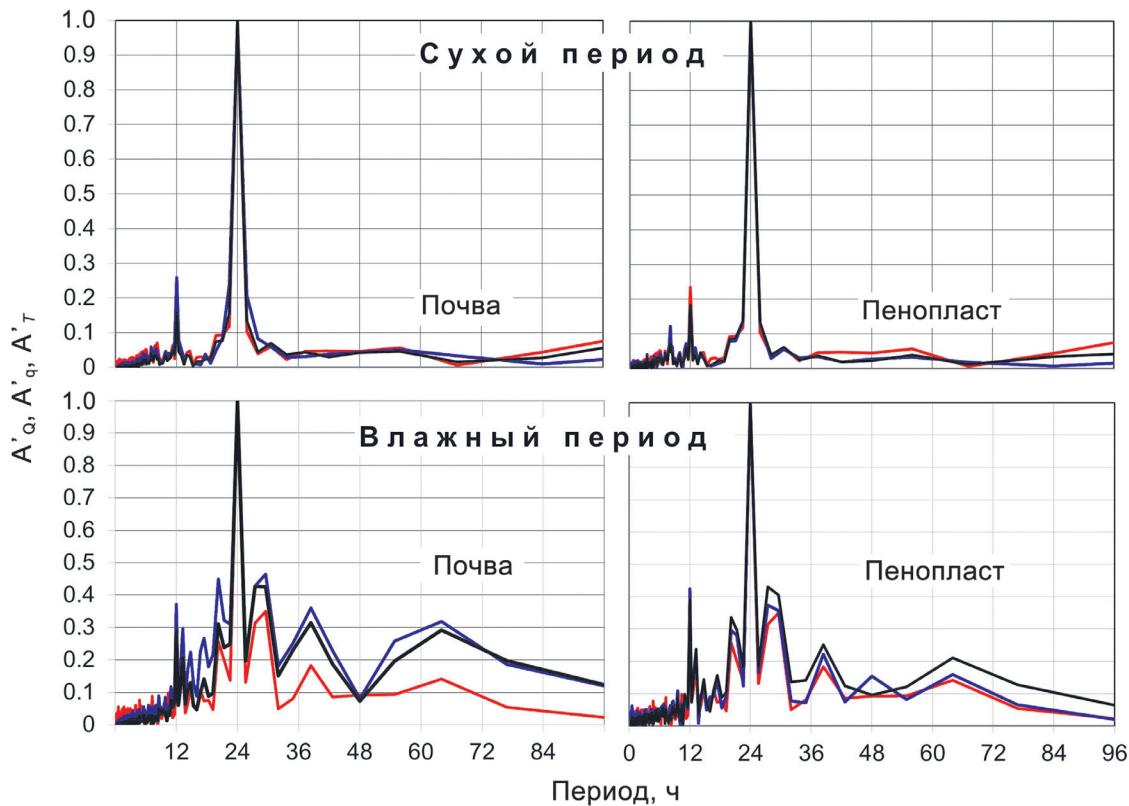
The vertical green lines indicate solar noon. Local time.

$C = 1500 \text{ Дж}(\text{кг}\cdot\text{К})$  (Ярцев и др., 2010):  $a = \lambda/(\rho C) = 1.6 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{s}$ .

Теоретические оценки фазовых сдвигов лучше всего согласуются с измеренными на грунте в сухой период: погрешность не превышает  $0.6^\circ$ . Для влажного периода погрешности несколько выше –  $2.7\text{--}4.7^\circ$ . Однако и в этом случае они близки к погрешностям, определяемым 10-минутной дискретностью отсчетов –  $2.5^\circ$  для 24-часового цикла и  $5.0^\circ$  для 12-часового. Еще выше погрешности оценки фазового сдвига на пенопластовом блоке в 24-часовом цикле –  $6.8\text{--}7.8^\circ$ . Здесь теоретическая модель переоценивает отклонение фазового сдвига от  $45^\circ$ , возможно, вследствие переоценки контрастности сред. Другая вероятная причина связана с относительной прозрачностью пенопласта для прямых солнечных лучей. Помимо кондуктивного, здесь действует и радиационный механизм теплообмена, не учитываемый моделью.

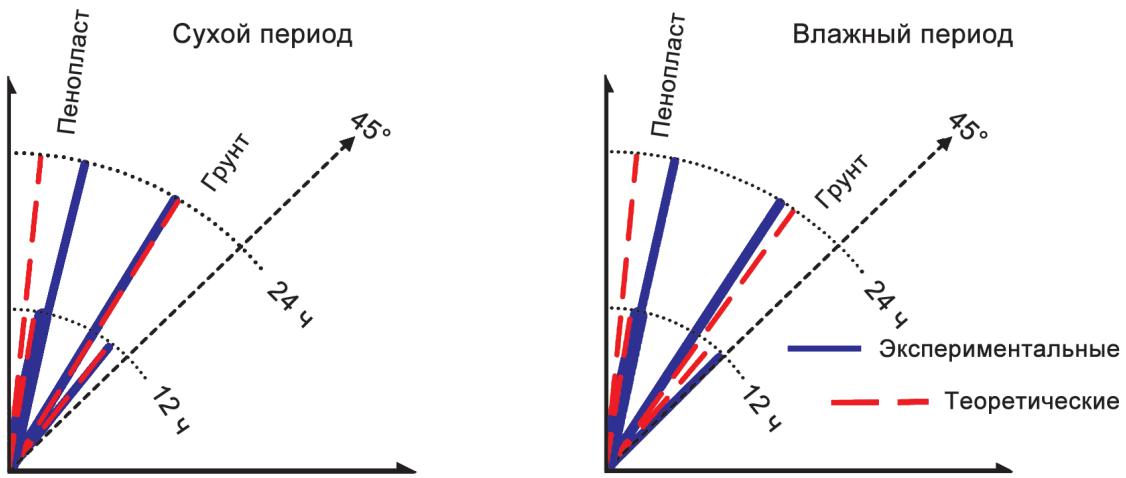
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг солнечной радиации, теплового потока через поверхности (грунта и искусственного слоя) и температуры поверхностей (грунта и искусственного слоя), проведенный на ОГМС “Верхнее Дуброво”, показал, что изменения теплового потока через поверхности происходят синхронно с изменениями суммарной солнечной радиации у земной поверхности, которая, в свою очередь, синхронна с изменениями инсоляции на верхней границе атмосферы. Максимумы всех этих тепловых потоков наблюдаются в солнечный полдень. Температурная реакция отстает от них на величину, определяемую тепловой неоднородностью грунта. Ранее предложенная нами модель температурного отклика земной поверхности на изменение внешнего радиационного воздействия в настоящем исследовании развита на случай теплофизически



**Рис. 8.** Нормализованные амплитудные спектры суммарной радиации (красные кривые), теплового потока через поверхность (синие кривые) и температуры поверхностей (черные кривые).

**Fig. 8.** Normalized amplitude spectra of global solar radiation (red curves), ground surface heat flux (blue curves) and surface temperatures (black curves).



**Рис. 9.** Диаграммы измеренных и рассчитанных в соответствии с моделью фазовых сдвигов колебаний температуры поверхности (естественного грунта и пенопластового включения) относительно колебаний теплового потока через поверхности в 24- и 12-часовом циклах.

**Fig. 9.** Diagrams of phase shifts of surface temperature variations (natural soil and soil with polystyrene foam inclusion), measured and calculated in accordance with the model relative to variations in heat flux through surfaces in 24- and 12-hour cycles.

неоднородного полупространства. Для простейшего случая неоднородности – наличия верхнего слоя с отличными от нижележащих пород теплофизическими свойствами – приведено и исследовано аналитическое выражение. В случае низкотеплопроводного верхнего слоя фазовый сдвиг уменьшается от значения для поверхности однородного полупространства ( $45^\circ$ ). Исследования грунта площадки ОГМС “Верхнее Дуброво” позволили построить теплофизический разрез и верифицировать модель по экспериментальным данным. Погрешности теоретических оценок в основном не превышают погрешности оценки фазы при 10-минутной дискретности отсчетов.

Полученные результаты могут найти применение в климатических (в том числе палеоклиматических) и экологических исследованиях, при изучении теплообмена на искусственных покрытиях городов и их роли в формировании городских островов тепла. В феврале 2021 г. Минобрнауки РФ запустило пилотный проект по созданию карбоновых полигонов для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса (<https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony/>). С учетом того, что экспансия почвенных газов в атмосферу, в том числе парниковых, контролируется тепловым режимом, результаты проведенных исследований найдут применение при решении этой проблемы.

## Благодарности

Авторы выражают признательность сотрудникам Федерального государственного бюджетного учреждения “Уральское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды” И.А. Роговскому, В.А. Тыртышникову, А.В. Коробову за помощь и содействие при проведении температурного мониторинга на площадке ОГМС “Верхнее Дуброво” и предоставление данных актинометрии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Горностаева А.А. (2014) Алгоритм расчета изменений теплового потока через земную поверхность по данным об изменениях температуры земной поверхности. *Уральский геофиз. вестн.*, **1**, 37-45.
- Горностаева А.А., Демежко Д.Ю., Антипин А.Н. (2019) Новая модель климатического отклика и ее применение для орбитальной настройки климатических реконструкций плейстоцена. *Геоф. процессы и биосфера*, **18**(4), 203-211. <https://doi.org/10.21455/GPB2019.4-17>
- Демежко Д.Ю. (2001) Геотермический метод реконструкции палеоклимата (на примере Урала). Екатеринбург: УрО РАН, 144 с.
- Казанцев С.А., Дучков А.Д. (2008) Аппаратура для мониторинга температуры и измерения теплофизических свойств мерзлых и талых пород. *Мат-лы Междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения”*. Тюмень, ИКЗ СО РАН, 112 с.

236-239.

Ревут И.Б. (1972) Физика почвы. М.: Колос, 368 с.  
Ярцев В.П., Андрианов К.А., Иванов Д.В. (2010) Физико-механические и технологические основы применения пенополистирола при дополнительном утеплении зданий и сооружений. Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 120 с.

- Abu-Hamdeh N.H., Reeder R.C. (2000) Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **64**(4), 1285-1290.
- Bennet W.B., Wang J., Bras R.L. (2008) Estimation of global ground heat flux. *J. Hydrometeorol.*, **9**, 744-759.
- Berger A., Loutre M.F. (1991) Insolation values for the climate of the last 10 million of years. *Quat. Sci. Rev.*, **10**(4), 297-317. [http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD\\_EARTH\\_LAND\\_NGDC\\_PALEOCLIM\\_INSOL.html](http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_EARTH_LAND_NGDC_PALEOCLIM_INSOL.html)
- Demezhko D.Y., Gornostaeva A.A. (2015) Late Pleistocene-Holocene ground surface heat flux changes reconstructed from borehole temperature data (the Urals, Russia). *Clim. Past*, **11**(4), 647-652.
- Douglass D.H., Blackman E.G. and Knox R.S. (2004) Temperature response of Earth to the annual solar irradiance cycle. *Phys. Lett. A*, **323**(3-4), 315-322.
- Fedorov V.M. (2015) Spatial and temporal variations in solar climate of the Earth in the present epoch. *Izvestiya, Atmospher. Ocean. Phys.*, **51**(8), 779-791.
- Hays J.D., Imbrie J., Shackleton N.J. (1976) Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science*, **194**, 1121.
- Kutzbach J.E., Liu X., Liu Z., Chen G. (2008) Simulation of the evolutionary response of global summer monsoons to orbital forcing over the past 280,000 years. *Clim. Dyn.*, **30**, 567-579. DOI 10.1007/s00382-007-0308-z
- Laskar J., Joutel F., Boudin F. (1993) Orbital, precessional, and insolation quantities for the Earth from  $-20$  Myr to  $+10$  Myr. *Astron. Astrophys.*, **270**, 522-533.
- Laskar J., Robutel P., Joutel F., Gastineau M., Correia A.C.M., Levrard B. (2004) A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astron. Astrophys.*, **428**(1), 261-285.
- Renner M., Brenner C., Mallick K., Wizemann H.D., Conte L., Trebs I., Wei J., Wulfmeyer V., Schulz K., Kleidon A. (2019) Using phase lags to evaluate model biases in simulating the diurnal cycle of evapotranspiration: a case study in Luxembourg. *Hydrol. Earth System Sci.*, **23**(1), 515-535.
- Sun T., Wang Z.H., Ni G.H. (2013) Revisiting the hysteresis effect in surface energy budgets. *Geophys. Res. Lett.*, **40**(9), 1741-1747.
- Waelbroeck C., Jouzel J., Labeyrie L., Lorius C., Labracherie M., Stievenard M. (1995) A comparison of the Vostok ice deuterium record and series from Southern Ocean core MD 88-770 over the last two glacial-interglacial cycles. *Clim. Dyn.*, **12**(2), 113-123.

## REFERENCES

- Abu-Hamdeh N.H., Reeder R.C. (2000) Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, **64**(4), 1285-1290.

- Bennet W.B., Wang J., Bras R.L. (2008) Estimation of global ground heat flux. *J. Hydrometeorol.*, **9**, 744-759.
- Berger A., Loutre M.F. (1991) Insolation values for the climate of the last 10 million of years. *Quat. Sci. Rev.*, **10**(4), 297-317. [http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD\\_EARTH\\_LAND\\_NGDC\\_PALEOCLIM\\_INSOL.html](http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_EARTH_LAND_NGDC_PALEOCLIM_INSOL.html)
- Demezhko D.Yu. (2001) Geothermal Method for Paleoclimatic Reconstructions (by the Example of the Urals). Ekaterinburg, URO RAN Publ., 144 p. (In Russ.)
- Demezhko D.Y., Gornostaeva A.A. (2015) Late Pleistocene–Holocene ground surface heat flux changes reconstructed from borehole temperature data (the Urals, Russia). *Clim. Past*, **11**(4), 647-652.
- Douglass D.H., Blackman E.G. and Knox R.S. (2004) Temperature response of Earth to the annual solar irradiance cycle. *Phys. Lett. A*, **323**(3-4), 315-322.
- Fedorov V.M. (2015) Spatial and temporal variations in solar climate of the Earth in the present epoch. *Izvestiya, Atmospher. Ocean. Phys.*, **51**(8), 779-791.
- Gornostaeva A.A. (2014) An algorithm for calculating the changes of heat flux across the Earth's surface from data on changes in Earth surface temperature. *Ural'skii Geofiz. Vestnik*, **1**, 37-45. (In Russ.)
- Gornostaeva A.A., Demezhko D.Y., Antipin A.N. (2019) A New Climate Response Model for the Orbital Tuning of Pleistocene Climate Reconstructions. *Izvestiya, Atmospher. Ocean. Phys.*, **55**(11), 1766-1773. <https://doi.org/10.1134/S0001433819110057>
- Hays J.D., Imbrie J., Shackleton N.J. (1976) Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science*, **194**, 1121. (In Russ.)
- Kazantsev S.A., Duchkov A.D. (2008) Tools for temperature monitoring and thermophysical properties measurements of frozen and thawed rocks. *Proc. of International Conf. "Cryogenic resources of polar and mountain regions. State of art and perspectives of Permafrost Engineering"*. Tyumen, IKZ SB RAS, 236-239. (In Russ.)
- Kutzbach J.E., Liu X., Liu Z., Chen G. (2008) Simulation of the evolutionary response of global summer monsoons to orbital forcing over the past 280,000 years. *Clim. Dyn.*, **30**, 567-579. DOI 10.1007/s00382-007-0308-z
- Laskar J., Joutel F., Boudin F. (1993) Orbital, precessional, and insolation quantities for the Earth from -20 Myr to +10 Myr. *Astron. Astrophys.*, **270**, 522-533.
- Laskar J., Robutel P., Joutel F., Gastineau M., Correia A.C.M., Levrard B. (2004) A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astron. Astrophys.*, **428**(1), 261-285.
- Renner M., Brenner C., Mallick K., Wizemann H.D., Conte L., Trebs I., Wei J., Wulfmeyer V., Schulz K., Kleidon A. (2019) Using phase lags to evaluate model biases in simulating the diurnal cycle of evapotranspiration: a case study in Luxembourg. *Hydrol. Earth System Sci.*, **23**(1), 515-535.
- Revut I.B. (1972) Physics of soils. Moscow, Kolos Publ., 368 p. (In Russ.)
- Sun T., Wang Z.H., Ni G.H. (2013) Revisiting the hysteresis effect in surface energy budgets. *Geophys. Res. Lett.*, **40**(9), 1741-1747.
- Waelbroeck C., Jouzel J., Labeyrie L., Lorius C., Labracherie M., Stievenard M. (1995) A comparison of the Vostok ice deuterium record and series from Southern Ocean core MD 88-770 over the last two glacial-interglacial cycles. *Clim. Dyn.*, **12**(2), 113-123.
- Yartsev V.P., Andrianov K.A., Ivanov D.V. (2010) Physic-mechanical and technological bases of the use of expanded polystyrene for additional insulation of buildings and structures. Tambov, Publishing house of GOU VPO TSTU, 120 p. (In Russ.)