

УДК 55(063)  
ББК 26.3я43  
Г36

**Рецензенты:**

**Плоткина Юлия Владимировна** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории изотопной геологии Института геологии и геохронологии докембрия РАН

**Максимов Олег Александрович** – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории геологии и геодинамики докембрия Института геологии Карельского научного центра РАН

**Geological international student summit 2024. Геологический международный студенческий саммит 2024. Материалы конференции (4-8 апреля 2024 года, Санкт-Петербург).** – Санкт-Петербург: Свое издательство, 2024. – 252 с.

ISBN 978-5-4386-2257-4

В сборнике представлены тезисы докладов участников Геологического Международного Студенческого Саммита 2024 (Geological International Student Summit 2024). Доклады студентов и молодых ученых были представлены 5-6 апреля 2024 года в Санкт-Петербурге.

Темы докладов освещают актуальные вопросы общей и региональной геологии, тектоники и геодинамики, рудообразования, минералогии, геохимии, петрологии магматических и метаморфических процессов, геофизики, геологии нефти и газа, инженерной геологии и геоэкологии. Материалы сборника демонстрируют достижения студентов и молодых ученых в сфере наук о Земле.

Конференция проводилась Студенческим научным обществом Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета при финансовой поддержке Института наук о Земле СПбГУ, профсоюзной организации СПбГУ, ООО «ЛИМС» и ГК «Открытая геология».

Текст тезисов и изображения представлены в авторской редакции.

ISBN 978-5-4386-2257-4



9 785438 622574 >

## СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛООБМЕНА ПОВЕРХНОСТИ С АТМОСФЕРОЙ С ДАННЫМИ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ РАЙОНА ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Шерстенникова С.Р.<sup>1,2\*</sup>, Прохорова У.В.<sup>3</sup>, Немчинова А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7-9, Санкт-Петербург, 199034, Россия, \*sonya.sherstennikova@gmail.com

<sup>2</sup>Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, ул. Мерзлотная, 36, Якутск, 677010, Россия

<sup>3</sup>Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ул. Беринга, 38, Санкт-Петербург, 199397, Россия

Теплообмен между поверхностью Земли и атмосферой играет важную роль в протекании многих природных процессов. Математическое моделирование позволяет оценить влияние различных факторов на теплообмен между средами. Однако для проверки необходимо сравнение результатов с натурными измерениями, которое поможет оценить достоверность и корректность полученных результатов моделирования.

Авторами рассматривается математическая модель, рассчитывающая радиационный баланс земной поверхности, с помощью которого можно оценить величину теплового потока из атмосферы в грунт. Это важно, поскольку эта величина обычно используется в моделях в качестве граничного условия (Попов и др., 2023). В работе также проводится сравнение результатов моделирования, с данными исследований, которые получены авторами в ходе полевых работ в районе реки Шестаковка (Центральная Якутия) в 2022-2023 гг.

Рассмотрим метод косвенного расчёта радиационного баланса. Приток тепла в виде лучистой энергии является важнейшей составляющей общего притока тепла, под влиянием которого изменяется термический режим атмосферы и земной поверхности (Матвеев, 1984). Балансом лучистой энергии или радиационным балансом тела называется разность между поглощенной им солнечной радиацией и эффективным излучением поверхности (Кмитто и Скляр, 1981). Для косвенного расчёта радиационного баланса воспользуемся соотношением:

$$A = Q(1 - \alpha) - E_{\text{эф}}, \quad (1)$$

где  $A$  – поток тепла, затрачиваемого на изменение температуры поверхности;  $Q$  – поток приходящей солнечной радиации (коротковолновый диапазон излучения);  $\alpha$  – альbedo поверхности;  $E_{\text{эф}}$  – длинноволновое излучение. В ночное время, при отсутствии солнечной радиации в (1) в правой части остаётся лишь второе слагаемое.

В свою очередь, входными параметрами для модели служат астрономические факторы (зенитный и часовой угол Солнца), географические координаты, морфометрические характе-

ристики рельефа, прозрачность атмосферы и отражательная способность поверхности для слагаемого  $Q(1 - \alpha)$ , и температура воздуха, температура поверхности, облачность и излучательная способность поверхности, принятая за 0.75 для песчаных отложений для  $E_{эф}$  (Прохорова и др., 2021; Матвеев, 1984).

Рассмотрим случай ночного выхолаживания грунта. Согласно Д. Бренту (Матвеев, 1984), ночное понижение температуры сопровождается образованием слоя инверсии, и охлаждение грунта происходит под влиянием эффективного излучения поверхности Земли:

$$-\lambda \cdot \frac{\delta T}{\delta h} = -E_{эф} \quad (2)$$

где  $\delta T$  – изменение температуры грунта с глубиной  $\delta h$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, который, в свою очередь, по большей части зависит от влажности почвы и плотности её скелета. Воспользуемся эмпирическим соотношением Р.И. Гаврильева, выведенной для грунтов центральной Якутии:

$$\lambda(\gamma_{ск}, W) = 0.025 + 0.238\gamma_{ск} - 0.193\gamma_{ск}^2 + 0.114\gamma_{ск}^3 + \left[ b_1 \frac{W}{W_H} + b_2 \left( \frac{W}{W_H} \right)^2 \right] \times \left\{ \lambda_{вл} \left[ 1 + \frac{l_2}{1 + l_3(W_H - 0.15) + l_4(W_H - 0.15)^2} \right] - 0.025 + 0.238\gamma_{ск} - 0.193\gamma_{ск}^2 + 0.114\gamma_{ск}^3 \right\},$$

где  $\gamma$  и  $W$  – текущие плотность скелета ( $г/см^3$ ) и влажность (отн. ед.) грунтов;  $W_H$  – влажность полного влагонасыщения;  $\lambda_{вл}$  – коэффициент теплопроводности влаги в грунтах, равный 0.58 Вт/(м К) талом состоянии грунта;  $0 < W < W_H$ . Для песчаного грунта (Лебедева и др., 2019)  $b_1 = 1.96$ ,  $b_2 = -0.96$ ,  $l_2 = 2.84$ ,  $l_3 = 3.32$ ,  $l_4 = 1.32$  (Гаврильев, 1999).

Имеется другой, менее известный, однако достаточно перспективный расчётный способ (Сосновский, 1984), который с успехом применялся для задач моделирования процессов тепломассопереноса в грунтах на Шпицбергене, в Антарктиде и в Якутии (Сосновский 1984, 2006; Сосновский и Осокин, 2018; Sukhanova et al., 2023). Для этого вычислим эффективные значения коэффициента теплообмена и температуры окружающего воздуха ( $\alpha_E$  и  $\theta_E$  соответственно), которые описываются уравнениями состояния (Сосновский, 1984):

$$c_{\alpha_E} = \alpha(1 + 1.95 \times 10^{-2}a) + 0.205(\theta_A/100)^3$$

$$\theta_E = \{\alpha[\theta_A - 1.95 \times 10^{-2}(b - p_A \omega_A)] + 19.9(\theta_A/100)^4\} / \alpha_E, \quad (3)$$

где  $p_A$  и  $\omega_A$  – упругость насыщенного водяного пара при температуре  $\theta_A$  и относительная

влажность воздуха. Коэффициенты  $a$  и  $b$  описывают линейную аппроксимацию  $\rho_A(\theta)$ ,  $\rho_A(\theta) = a\theta + b$ . Параметры соотношения (4) обсуждаются в работе (Сосновский, 1984). Тогда:

$$\lambda \cdot \frac{\delta T}{\delta h} = \alpha_E(\theta_0 - \theta_E), \quad (4)$$

где  $\theta_0$  – температура земной поверхности.

Примем за плотность песчаных отложений её среднее значение в естественном залегании  $1500 \text{ кг/м}^3$  (Алексеев и Калугин, 2009). Вычислим эффективное излучение ночной поверхности и выразим  $\lambda$  из вышеуказанных уравнений теплопроводности двумя способами (метод косвенного расчёта радиационного баланса и метод А.В. Сосновского), затем сравним полученные значения влажности грунта, которые будут соответствовать вычисленной теплопроводности. Это и будет являться проверкой проведенных расчётов.

Таблица 1. Примеры результатов расчёта коэффициента теплопроводности

Дата	Время	Формулы (1), (2)		Формулы (3), (4)	
		W, отн. ед.	$\lambda$ , Вт/(м · К)	W, отн. ед.	$\lambda$ , Вт/(м · К),
19.09.2022	0:00	0.13	1.28	0.12	1.20
21.09.2022	3:00	0.10	1.12	0.10	1.12
29.08.2023	0:00	0.08	1.09	0.07	1.06
30.08.2023	0:00	0.07	1.07	0.07	1.06
01.09.2023	3:00	0.11	1.15	0.10	1.12

Влажность грунта, при одинаковой его плотности, изменяется в диапазоне 0.05-0.15 для первого метода и 0.05-0.12 для второго, что не противоречит наблюдавшимся погодным условиям в период выполнения полевых работ.

В целом, проведённое сравнение показывает, что оба метода дают схожие результаты, и выбрать наилучший между ними достаточно сложно. Для этого необходимо наличие влажности грунта на момент выполнения измерений. Вторым, вероятно более точным методом, является моделирование процессов теплопереноса на длительный срок, и сравнение полученных результатов с данными термометрии (Лебедева и др., 2019). Это и является следующим этапом работы авторов.

Авторы благодарят Попова С.В. (СПбГУ) за помощь при подготовке настоящей публикации, Безгрешнова А.М. и Иванова Б.В. (АНИИ) за предоставление приборов и помощь в работе с ними, Андрееву Д.О. (СПбГУ) и Боронину А.С. (ГИИ) за помощь в выполнении полевых измерений, Лебедеву Л.С. (ИМЗ СО РАН) за организацию и логистическое обеспечение полевых работ, также своих коллег из СПбГУ, АНИИ и Института мерзлотоведения за помощь при выполнении исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта

РНФ и Якутского научного фонда Проект № 22-17-20040 «Субаэральные и подозёрные талики в сплошной криолитозоне Восточной Сибири: происхождение, современное состояние и реакция на изменение климата».

### Список литературы

- Алексеев В.М., Калугин П.И.* Физико-механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения / Воронеж: ВГАСУ, 2009. – 89 с.
- Гаврильев Р.И.* Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. Автореф. дисс. докт. техн. наук. Якутск.: Изд-во Институт мерзлотоведения им. акад. П.И. Мельникова, 1999. 362 с.
- Кмито А.А., Скляров Ю.А.* Пиргелиометрия / Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 232 с.
- Лебедева Л.С., Бажин К.И., Христофоров И.И., Абрамов А.А., Павлова Н.А., Ефремов В.С., Огонеров В.В., Тарбеева А.М., Федоров М.П., Нестерова Н.В., Макарьева О.М.* Надмерзлотные субаэральные талики в бассейне реки Шестаковка (Центральная Якутия) // Криосфера Земли, 2019. Т. XXIII. № 1. С. 40–50.
- Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы // Под ред. В. Г. Морачевского – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 738 с.
- Попов С.В., Боронина А.С., Лебедева Л.С.* Моделирование температуры грунта на участках распространения субаэральнх таликов Центральной Якутии на примере водосбора реки Шестаковка // Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции «Мерзлотные почвы в антропоцене», Салехард – Лабытнанги, ЯНАО, Россия, 20-26 августа 2023, С. 123–124.
- Прохорова У.В., Терехов А.В., Иванов Б.В., Веркулич С.Р.* Расчёт составляющих теплового баланса ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) в период абляции по данным наблюдений 2019 года // Криосфера Земли, 2021. Т. XXV. № 3. С. 50–60.
- Сосновский А.В., Осокин Н.И.* Влияние мохового и снежного покровов на устойчивость многолетней мерзлоты на Западном Шпицбергене при климатических изменениях // Вестник Кольского научного центра РАН, 2018. № 3. С. 178–184.
- Сосновский А.В.* Математическое моделирование влияния толщины снежного покрова на деградацию мерзлоты при потеплении климата // Криосфера Земли, 2006. Т. X. № 3. С. 83–88.
- Sukhanova A., Bantsev D., Popov S., Boronina A., Shimanchuk E., Polyakov S.* The current state of Lake Dǎlk (Larsemann hills, East Antarctica) // Polar Science, 2023. V. 38. P. 100–106.