



Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова  
Географический факультет  
Кафедра метеорологии и климатологии



# ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ СО ВЗВЕШЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ ДЛЯ МОДЕЛИ ЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ ИВМ РАН



[www.kolizej.at.ua](http://www.kolizej.at.ua)

Марчук Е. А.<sup>1</sup>, Степанентко В. М.<sup>1,2</sup>,  
Репина И. А.<sup>3,2</sup>

1. *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*
2. *НИВЦ МГУ*
3. *Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН*



Томск - 2018

## Цель:

Оценка и усовершенствование схемы расчёта приземных турбулентных потоков для высоких широт модели Земной системы ИВМ РАН с использованием данных стационарных измерений.

## Задачи:

Оценить влияние фактора стратификации на величины потоков явного тепла и импульса;

Совершенствование схемы расчёта турбулентных потоков с учётом особенностей снежной поверхности;

Совершенствование схемы расчёта турбулентных потоков путём включения влияния эффекта взвешенных частиц (низовой метели) на приповерхностные турбулентные потоки.

# Теория Момина - Обухова

Профили метеовеличин с учетом стратификации:

$$\theta(z) - \theta_s = \frac{\theta_*}{k} \left( \ln \frac{z}{z_{0T}} + \Phi_\theta \left( \frac{z}{L} \right) - \Phi_\theta \left( \frac{z_{0T}}{L} \right) \right)$$

$$u(z) - u_s = \frac{u_*}{k} \left( \ln \frac{z}{z_{0u}} + \Phi_u \left( \frac{z}{L} \right) - \Phi_u \left( \frac{z_{0u}}{L} \right) \right)$$

где  $\xi$  – параметр плавучести,  
 $L$  – масштаб Обухова,  
 $\theta$  – потенциальная температура,  
 $z$  – высота измерений,  
 $z_{0T}$  – коэф. терм. шероховатости,  
 $z_{0u}$  – коэф. динам. шероховатости.

Турбулентные потоки явного тепла  $H$  и импульса  $\tau$ :

$$H = \frac{\theta_*}{\rho C_p u_*}$$

$$\tau = \rho u_*^2$$

где  $\rho$  – плотность воздуха,  
 $C_p$  – удельная газовая постоянная при  
постоянном давлении.

Теория Момина – Обухова описывает связь профиля и турбулентного потока величины в приземном слое, а вместе с тем и способ расчёта турбулентного потока.

(Монин , Обухов, 1954)

# Основные причины ошибки потоков явного тепла и импульса:

- Безразмерные функции параметра стратификации по теории Монина – Обухова;
- Коэффициент динамической шероховатости;
- Коэффициент термической шероховатости;



# Параметризация коэффициента динамической шероховатости $Z_{0u}$

$$Z_{0u} = 0.01 \text{ м}$$

$$Z_{0u} = \frac{0.135\nu}{u_*} + 2.0 \times 10^{-4} \exp\left[-\left(\frac{u_* - 0.25}{0.15}\right)^2\right] + \frac{0.03u_*^2}{g}$$

Аэродинамически-гладкое обтекание

Учёт микромасштабной шероховатости поверхности льда и снега

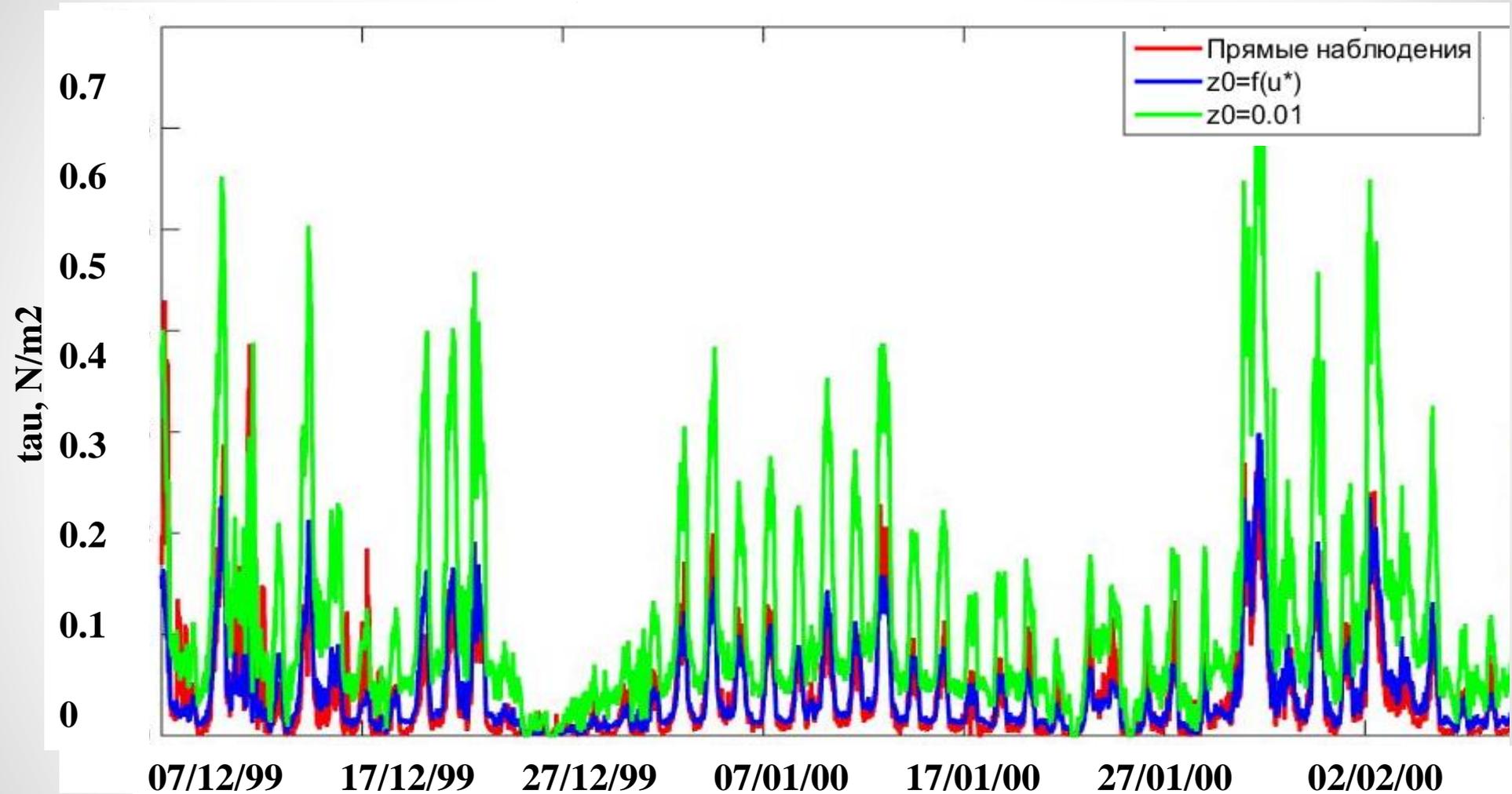
Учёт наносов и заструг на заснеженной поверхности

где  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха,  
 $g$  – ускорение свободного падения,  
 $u_*$  – динамическая скорость;

(Andreas and al, 2005)



# Сравнение потока импульса



Поток импульса ( $\tau$ ) для различных значений коэффициента шероховатости на станции Dome C за период 1999 – 2000 годы летние месяцы. По оси x показано количество измерений.

# Схема расчёта термической шероховатости $Z_{0T}$

## Измерены:

- ✓ Поток явного тепла  $H$ ;
- ✓ Динамическая скорость  $u_*$ ;
- ✓ Температура поверхности  $T_{surf}$  и воздуха  $T_{air}$ ;

$\theta$  – потенциальная температура,  
 $k$  – константа Кармана (0.4),  
 $z$  – высота измерений (2 м),  
 $Z_{0T}$  – коэффициент термической шероховатости,  
 $\Phi_T, \Phi_{T0}$  – безразмерные универсальные функции.

## Формулы для нахождения профиля метеовеличин по теории Монина – Обухова:

$$\theta(z) - \theta_s = \frac{\theta_*}{k} \left( \ln \frac{z}{Z_{0T}} + \Phi_\theta \left( \frac{z}{L} \right) - \Phi_\theta \left( \frac{Z_{0T}}{L} \right) \right)$$

$$u_{air} - u_{surf} = \frac{u_*}{k} \left( \ln \frac{z}{Z_{0u}} + \Phi_u \left( \frac{z}{L} \right) - \Phi_u \left( \frac{Z_{0u}}{L} \right) \right)$$

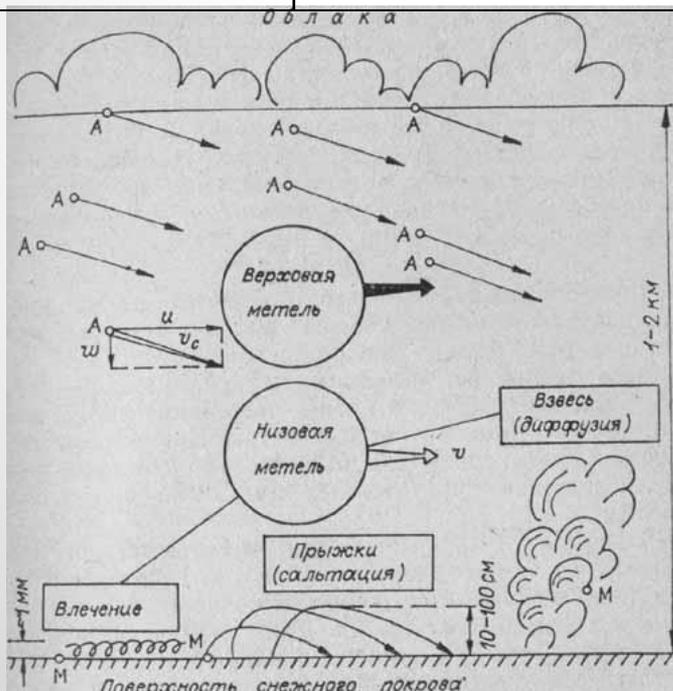
$$\{10^{-6} - 10^{-4} \text{ м}\} \Rightarrow Z_{0T} = 5 * 10^{-6} \text{ м}$$

Таким образом, коэффициент термической шероховатости подбирается так, чтобы теория Монина – Обухова правильно воспроизводила измеренный поток явного тепла.

# Параметризация взвешенных частиц

Таблица 1. Случаи метелевого переноса на антарктических станциях и на Шпицбергене.

Название Станции	Периоды измерений	Количество измерений	Количество случаев с метелью	Процентное соотношение
Dome_C	1.12.99 – 2.02.00	8190	281	3,4 %
Мирный	2.01.00 – 12.01.00	529	320	60 %
Шпицберген	02.05.09 – 15.05.09	21603	3122	14 %



(Дюнин, 1983)

## Критерии выделения критической скорости ветра:

$$\checkmark v \geq 7 - 8 \frac{\text{M}}{\text{с}}$$

$$\checkmark U_t(10) = a + bT + cT^2(2)$$

где  $a, b, c$  - эмпирические коэффициенты  $U_t(10)$  – критическая скорость ветра, сравниваемая с измеренной на высоте 10 м.

Наличие взвешенных частиц усиливает устойчивость стратификации

# Параметризация взвешенных частиц

При наличие частиц, воздушный поток становится двухфазным

$$\rho = \rho_a(1 - S) + \rho_s S = \rho_a(1 + \sigma S)$$

где  $\sigma = \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a}$ ,  $\rho_s$  – плотность снежных частиц =  $100 \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]$ ,  $S$  – объёмная концентрация взвешенных частиц  $\left[ \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3} \right]$ .

$$L = \frac{(1 + \bar{\sigma} \bar{S}) u_*^3}{\kappa g \left[ -\frac{1}{\bar{\theta}} \overline{w' \theta'} (1 - \bar{S}) + \bar{\sigma} \overline{S' w'} \right]}$$

где  $\overline{w' \theta'} = \frac{H}{\rho c_p}$ ,  $H$  – поток явного тепла,  $c_p$  – удельная газовая постоянная при постоянном давлении.

Турбулентный поток концентрации снежных частиц:

$$\overline{S' w'} = -K_s \frac{dS}{dz}$$



$$K_s \frac{dS}{dz} = -w_s S$$

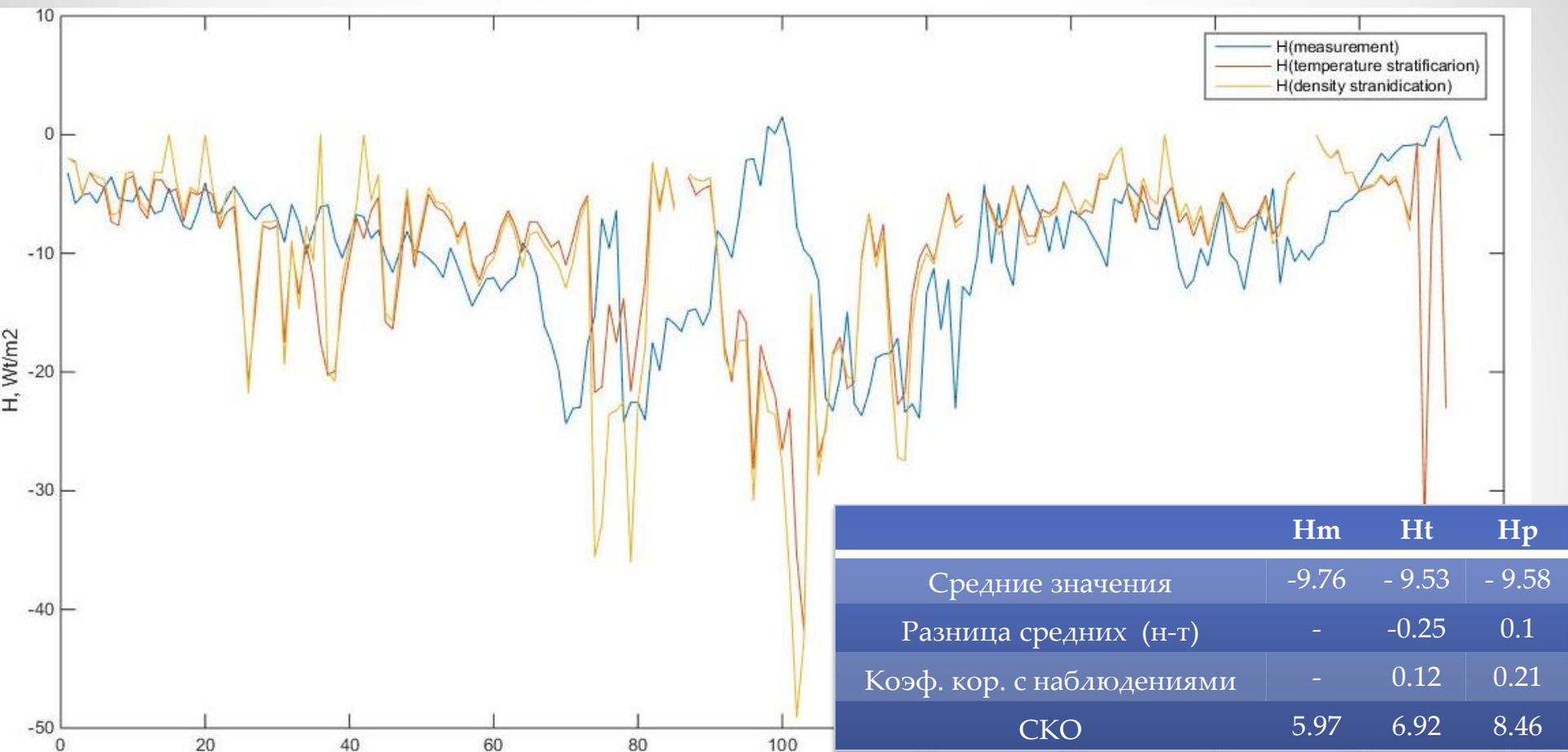
где  $w_s$  – скорость оседания снежных частиц.

где  $K_s$  – коэффициент турбулентной диффузии для взвешенных частиц.

Предположение уравнивания вертикального турбулентного потока за счёт гравитационного оседания

(Wamser C., Lykossov V. N., 1995)

# Параметризация взвешенных частиц



Сравнение потока явного тепла ( $H$ ) для различных типов стратификации (отдельно по концентрации частиц, отдельно по температуре, отдельно наблюдения, отдельно для нейтральной стратификации), отобранных по критическому значению скорости ветра, на станции Мирный за период 2.01.00 – 12.01.00 гг.. По оси  $x$  показано количество измерений.

# Выводы



Рассчитанная по формуле Андриаса величина коэффициента динамической шероховатости лучше описывает особенности поверхности континентальной части Антарктиды, нежели использовавшееся раньше в модели ИВМ РАН постоянное значение.



Получено новое значение коэффициента термической шероховатости. Рассчитанный с помощью него поток явного тепла лучше коррелирует с наблюдаемыми величинами



При внедрении параметризации взвешенных частиц в блок постоянных потоков модели ИВМ РАН выяснилось: при учёте одновременно стратификации по температуре и по плотности итерационный процесс, заложенный в основе программы, не сходится. При учёте же только стратификации по температуре или только стратификации по концентрации частиц получаются значения потоков тепла и импульса, приближенные к реальным.

Планы на будущее:

- 1) Доработка схемы расчёта приземных потоков с внедрённой параметризацией взвешенных частиц;
- 2) Внедрение параметризации взвешенных частиц в модель ИВМ РАН;

# Спасибо за внимание!

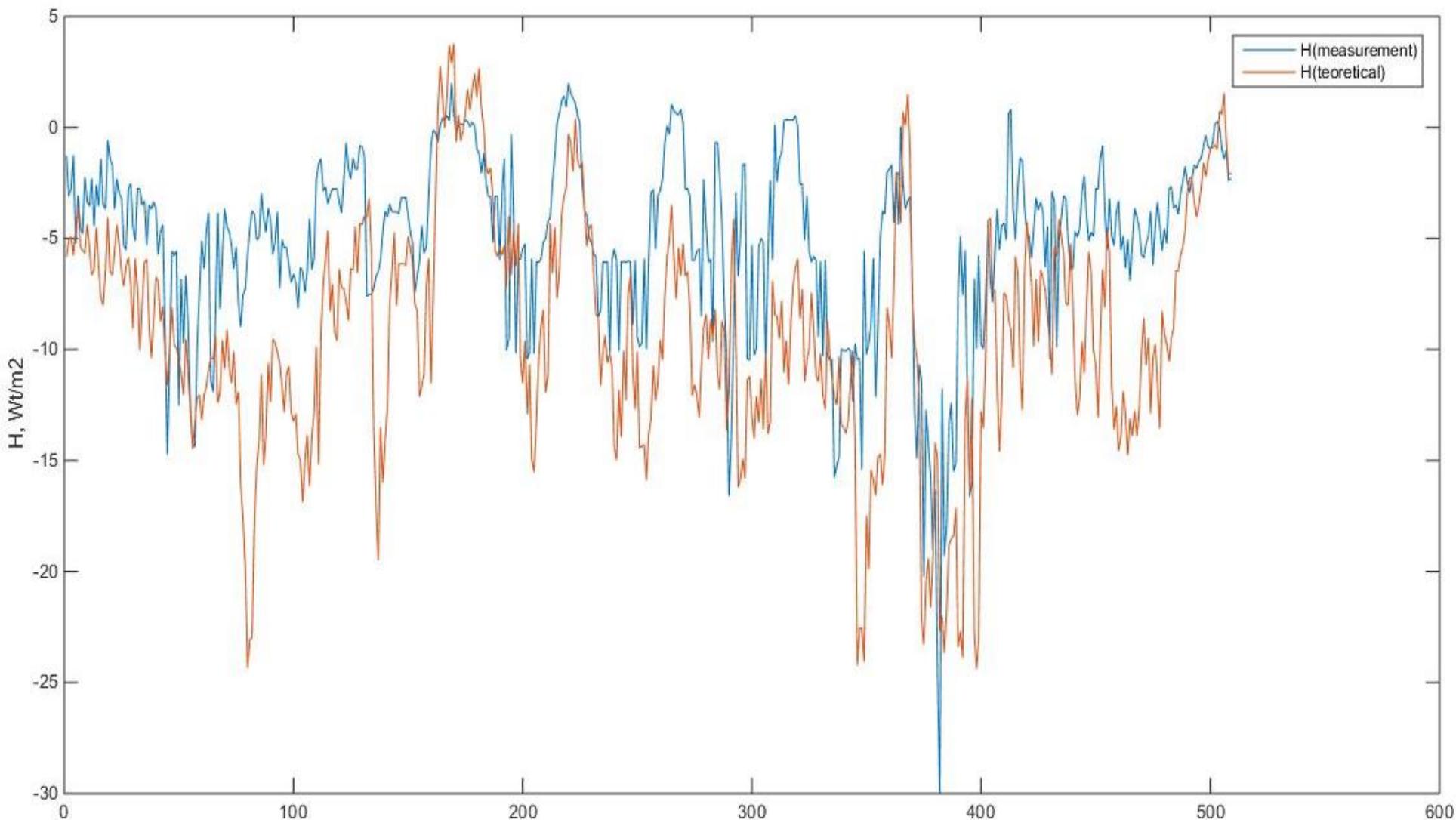


[www. about-planet.ru](http://www.about-planet.ru)

	Measured (наблюдения)	$z_0 = f(u^*)$	$z_0 = 0.01$	$z_0 = 0.1$
СКО	9,8	38,81	71,8	185,54
Коэффициент корреляции	-	0,861	0,853	0,849
Разница средних значений	-	-23,6	-42,26	-108,97
Коэффициент вариации	5,5	1,51	1,63	1,67

Статистические критерии качества воспроизведения потока явного тепла (H) для различных значений коэффициента динамической шероховатости на станции Dome C.

Станция	Период измерений	Измеряемые параметры	Условия измерений
DOME C, Антарктика, Координаты 75 <sup>0</sup> 06'00 ю.ш. 123 <sup>0</sup> 19'58 в д	07.12.1999- 02.02.2000	Пульсации трех компонент скорости ветра и температуры (акустический анемометр МЕТЕК) на высоте 2 м, температура подстилающей поверхности (ИК-радиометр), метеопараметры (АМС)	Полярный день, ровная поверхность ледника, покрытая снегом
Мирный, Антарктика Координаты 66 <sup>0</sup> 33'20 ю.ш. 93 <sup>0</sup> 00'11 в д	02.01.2000 - 12.01.2000	Пульсации трех компонент скорости ветра и температуры (акустический анемометр МЕТЕК) на высоте 2 м, скорость ветра и температура на уровнях 2 и 5 м (АМС), влажность воздуха, давление	Полярный день, поверхность ледника, покрытая снегом, стоковый ветер
Шпицберген, станция Нью- Алесунд, Координаты 78 <sup>0</sup> 55'27 с.ш. 11 <sup>0</sup> 55'14 в д	09.04.2008 12.04.2008	Пульсации трех компонент скорости ветра и температуры (акустический анемометр МЕТЕК) на высоте 2 м, температура подстилающей поверхности (ИК-радиометр), температура воздуха (2 м), скорость ветра, влажность и давление (10 м)	Полярный день, ровная заснеженная поверхность, наличие мезомасштабных ветровых циркуляций (сток, бора)



*Сравнение потока явного тепла ( $H$ ), рассчитанного для всех значений скорости ветра на станции Мирный за период 2.01.00 – 12.01.00 гг.. По оси  $x$  показано количество измерений. Рассчитано с учётом стратификации по температуре.*