

УПРОЩЕННАЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛООБМЕНА ЛЕДНИКА С АТМОСФЕРОЙ В СЕЗОН АБЛЯЦИИ НА ПРИМЕРЕ ЛЕДНИКА АЛЬДЕГОНДА (О. ЗАПАДНЫЙ ШПИЦБЕРГЕН)

Докладчик: Прохорова У.В.,
к.г.н, с.н.с. ОВОиА, ФГБУ "ААНИИ", uvprokhorova@aaari.ru

Исследование проведено при участии: Терехова А.В., Шестаковой
А.А., Барскова К.В., Чечина Д.Г., Репиной И.А., Иванова Б.В.



— оценка роли турбулентных потоков в абляции низко-расположенных ледников центральной части архипелага Шпицберген и предложение простой практической формулы для их расчета.

Структура доклада

Часть 1. Актуальность темы и описание региона

Часть 2. Данные и методы

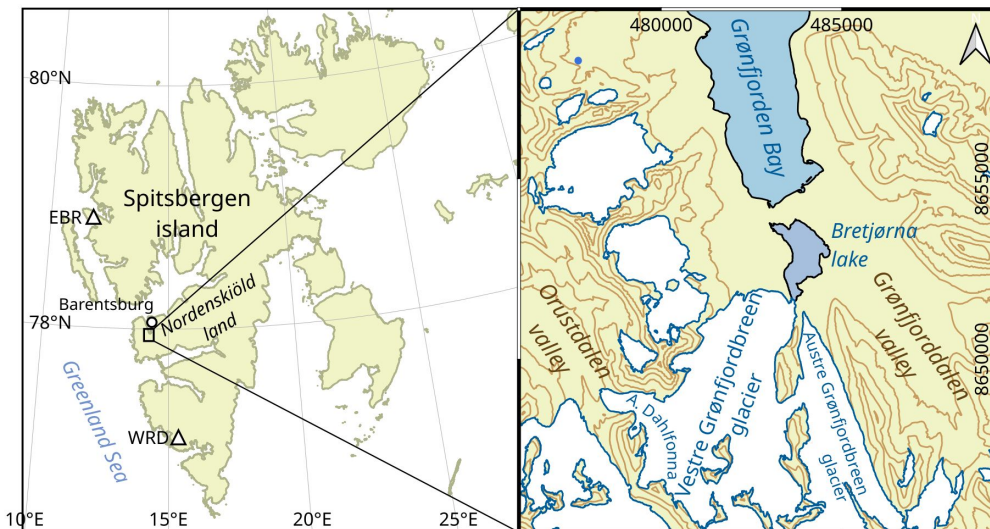
Часть 3. Влияние различных циркуляционных факторов на структуру теплового баланса и абляцию ледника Альдегонда в 2022

Часть 4. Роль турбулентного теплообмена в структуре баланса за период климатической нормы (1991-2020)

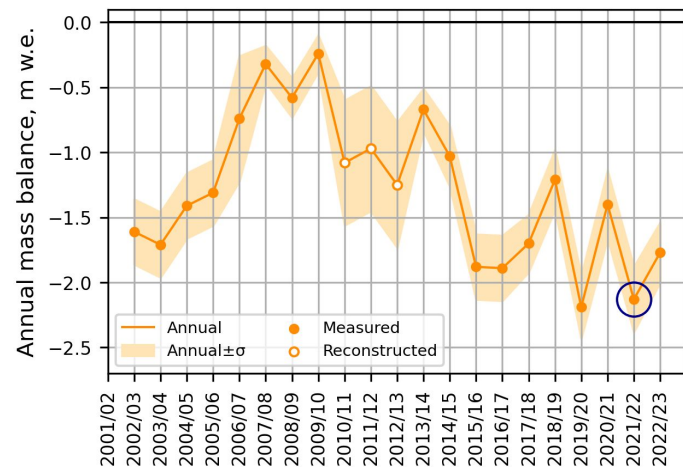
Часть 5*. Простая эмпирическая формула для учета потока явного тепла в период абляции



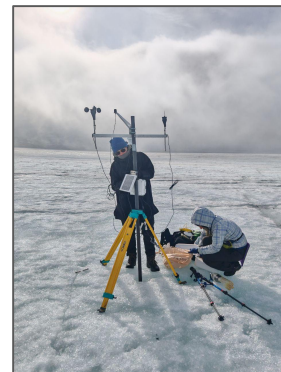
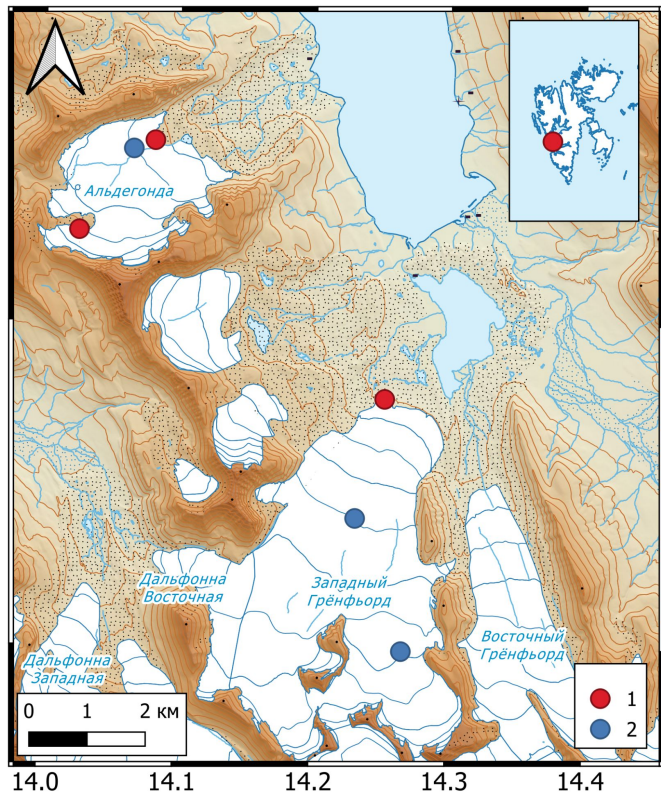
В работах (Aas, 2016; Zou, 2020; Прохорова, 2023 a,b) было показано, что хотя основным фактором, определяющим абляцию ледников, является коротковолновый баланс, однако для лет с экстремальным суммарным таянием характерно увеличение роли турбулентного теплообмена в структуре баланса.



Basemap data © Norwegian Polar Institute



Terekhov и др. (2023)



Данные и методы: методы оценки турбулентного теплообмена и их сравнение



Аэродинамический метод

Для оценки величин H , LE применяются формулы, в которые входят значения скорости ветра, температуры и относительной влажности воздуха на двух уровнях: вблизи поверхности ледника (s) и на некоторой высоте z :

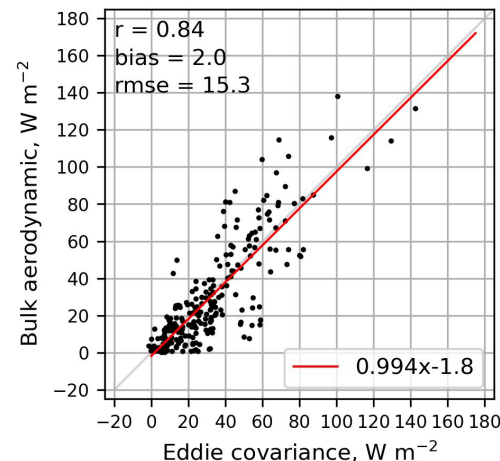
$$H = C_h c_p \rho_a u_z (T_z - T_s)$$
$$LE = C_e L_v \rho_a u_z \left(\frac{0.622}{p} \right) (e_z - e_s)$$

Пульсационный метод

Расчет турбулентных потоков явного тепла H производился по методу ковариации турбулентных пульсаций:

$$H = -c_p \rho_a \overline{w'T'}$$

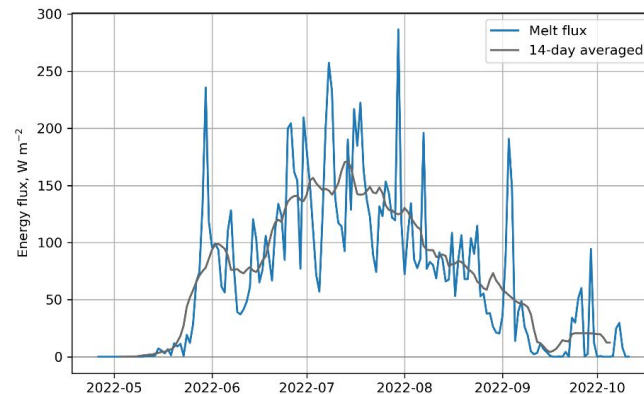
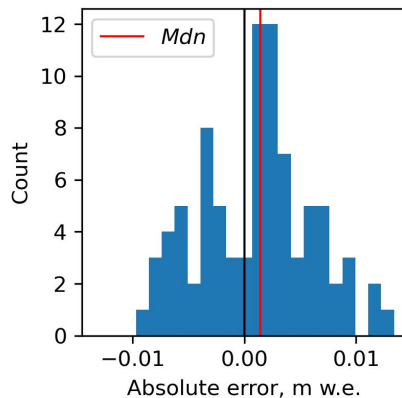
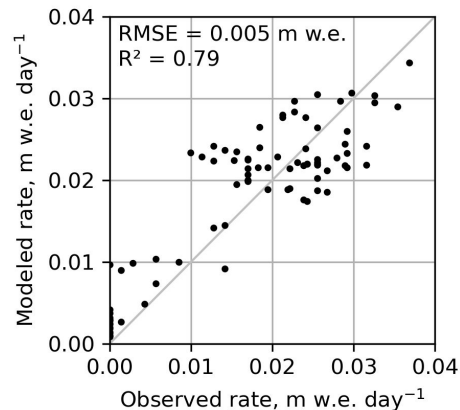
где ρ_a — плотность воздуха, рассчитанная на основе его температуры и давления, $c_p = 1010$ Дж/(кг · К) — удельная теплоёмкость воздуха.



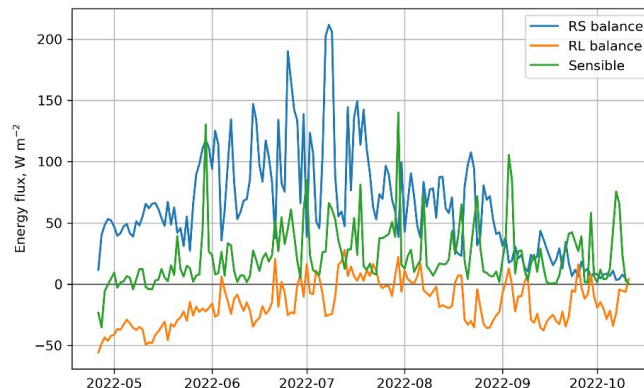
Значения параметров шероховатости (z_0m , z_0h) рассчитанные на основе измерений акустическим анемометром

z_0m , мм	z_0h , мм
0.8	0.08

Теплобалансовое моделирование: вклад компонентов теплового баланса в абляцию ледниковой поверхности



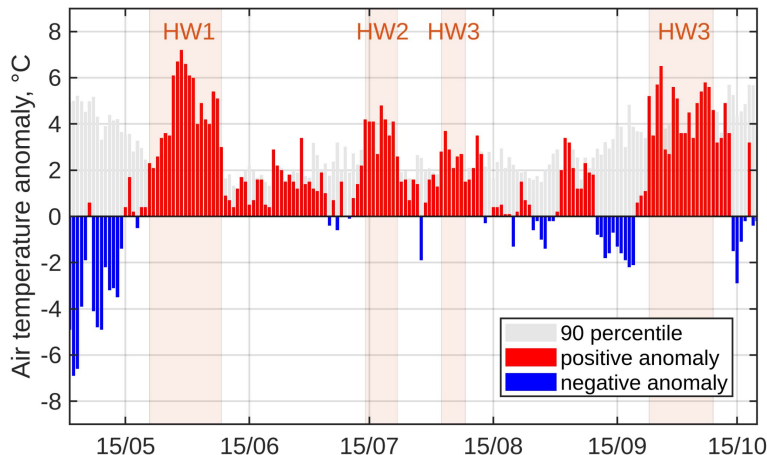
	Поток тепла, Вт м ⁻²	Соотношение положительных компонентов, %
Коротковолновый баланс	65.4	68%
Поток явного тепла	25.9	27%
Поток скрытого тепла	4.4	5%
Кондуктивный теплообмен	-4.9	—
Длинноволновый баланс	-12.2	—
Затраты тепла на таяние	78.5	—



Результаты: влияние волн тепла на компоненты теплового баланса

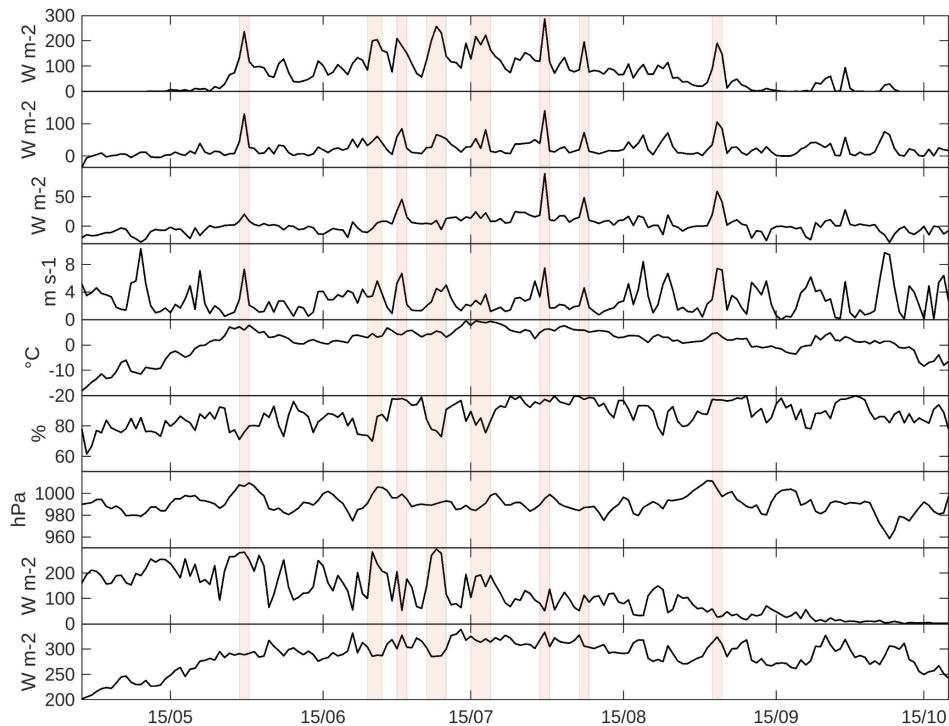


Волна тепла (heat wave) — это продолжительный период аномально высокой температуры, который значительно превышает средние климатические показатели для данного региона в определённое время года. Для её количественного определения в исследовании принят подход, основанный на статистике, предполагающий, что дни с аномалиями температуры воздуха, превышающими 90-й процентиль от нормы 1991–2020 гг., являются волной тепла. Поскольку волны тепла вызваны погодными явлениями синоптического масштаба, учитываются только периоды продолжительностью пять или более дней.



Heat wave	Dates	Duration	Mean anomaly		
			Sensible heat flux	Latent heat flux	Longwave balance
HW1	21 May – 08 June	19 days	+30.0	+25.6	6.1
HW2	14 Jul – 22 Jul	9 days	-9.7	+7.0	-2.1
HW3	02 Aug – 11 Aug	10 days	-14.4	+9.0	-13.6
HW4	23 Sep – 09 Oct	17 days	+35.3	+24.8	+14.3

Результаты: случаи увеличения турбулентных потоков в 2022 году (1)



«Melt event»-событиями считаются те, которые превысили 90-й процентиль по потоку тепла, доступного для таяния. Порог для 2022 года составил 49 мм водного эквивалента в день (соответствует потоку в 189 Вт/м²).

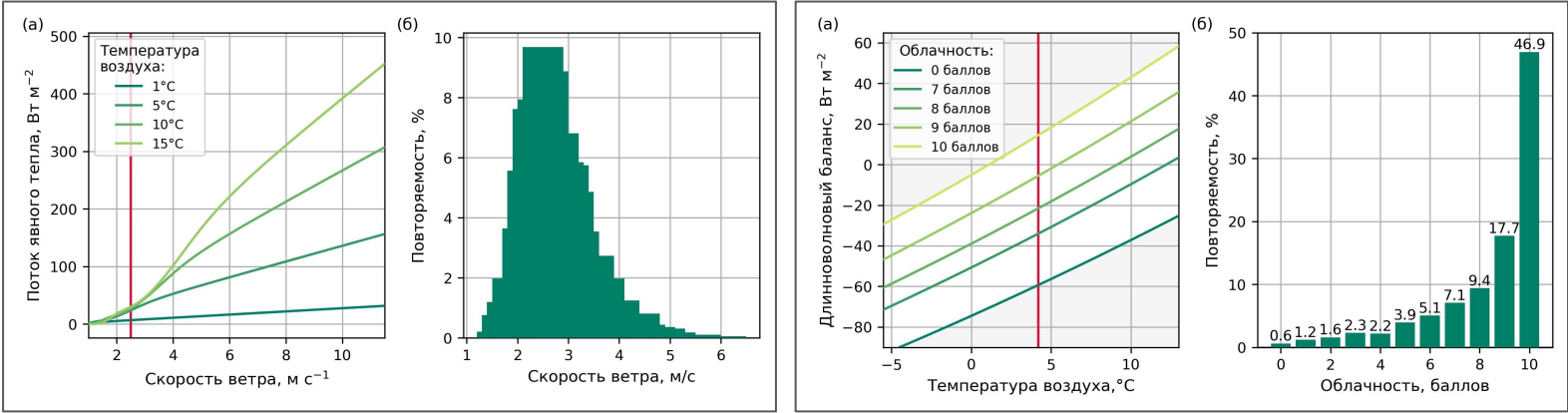
Dates	Duration, days	Melt rate, mm w.e. day ⁻¹	Mean sensible flux, W m ⁻²	Mean latent flux, W m ⁻²
30 May	1	61	130.4	20.3
25–26 June	2	52	53.1	0.7
30 June	1	54	60.2	26.2
7–9 July	3	60	51.3	2.4
16–18 July	3	54	53.1	20.0
30 July	1	74	140.2	89.6
7 August	1	51	72.4	48.8
3 September	1	49	105.5	59.4

Результаты: роль турбулентного теплообмена в масштабах 30-ти лет (1991-2020)



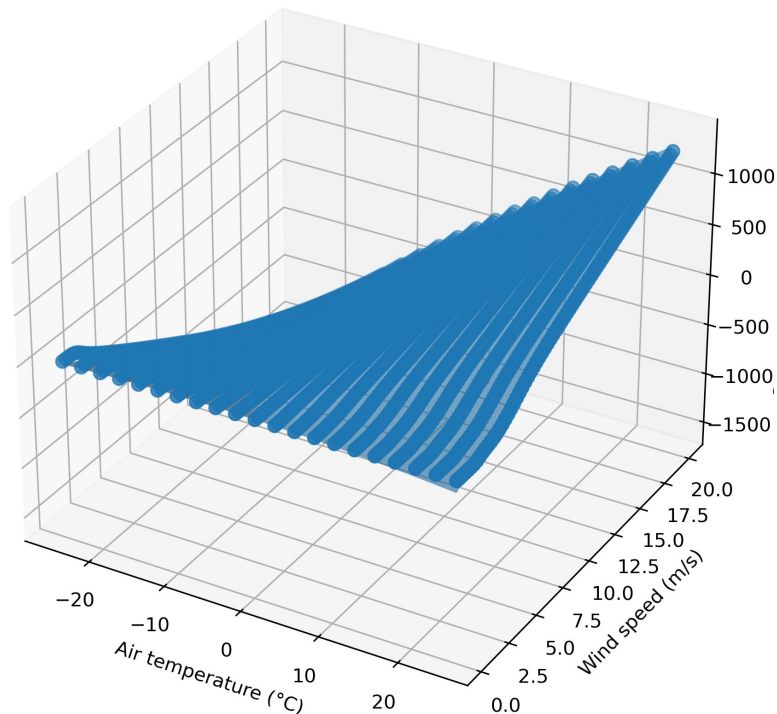
Облачность, балл Мода	Скорость ветра, м/с Мода	Скорость ветра, макс Мода	Температура воздуха, 2 м Среднее	Относительная влажность, % Среднее	Давление на ур. м, гПа Среднее
10	2.5	5.3	4.1	72.7	1012.5

H, Вт м⁻²	LE, Вт м⁻²	I, Вт м⁻²	Q, Вт м⁻²
20.5	-6.6	5.3	36 - 110
15% – 33%	-	4% – 9%	58% – 81%



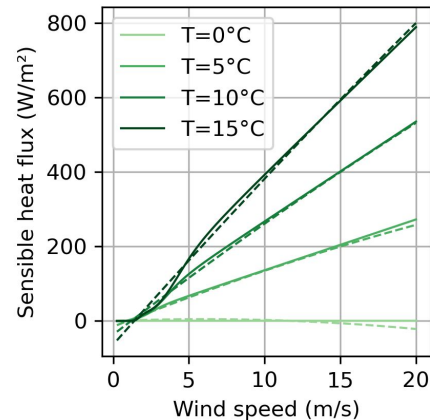


$$Q = -2,517 \cdot t_{2m} + 1,605 \cdot v_{2m} - 0,115 \cdot t_{2m}^2 + 2,951 \cdot t_{2m} v_{2m} - 0,134 \cdot v_{2m}^2$$



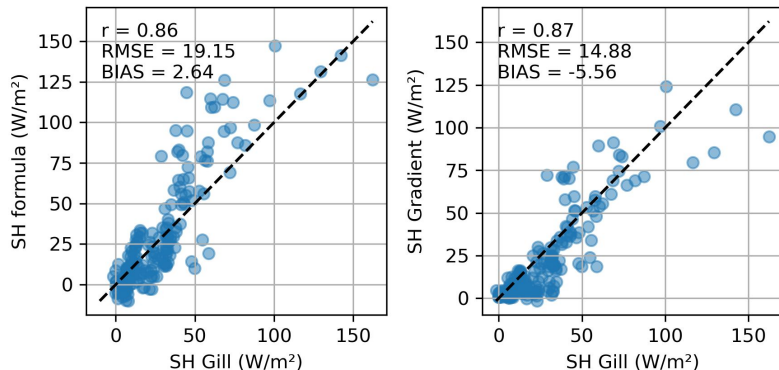
Допущения:

- поверхность ледника имеет околонулевую температуру;
- параметр шероховатости поверхности ледника близок к 1 мм.

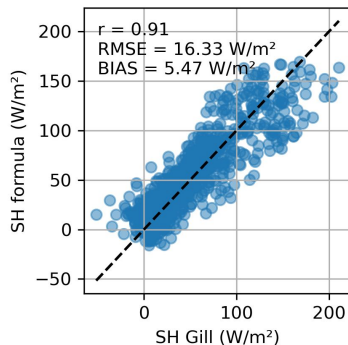




Альдегонда, 2022



Западный Грэнфьорд, 2025



Ограничения:

- ледники либо части ледников с развитым моренным чехлом (который влияет и на температуру поверхности, делая ее сильно отличной от нуля в обе стороны, и на шероховатость поверхности);
- ледники либо части ледников со значительно расчлененным рельефом (например, поля трещин).

Проверенные условия:

- температура воздуха от 0 до 9 °C;
- скорость ветра от 0 до 12 м/с.



1. Влияние волн тепла в начале и в конце сезона абляции принесло суммарно 28% дополнительного таяния от общего баланса массы за сезон наблюдений 2022; Однако их влияние на отдельные компоненты баланса — неоднозначно.
2. Возникновение дней с экстремальным таянием ледника, обусловлено ростом в турбулентных потоках, в первую очередь за счет увеличения скорости ветра;
3. По оценкам на основе климатической нормы в период современного потепления (1991–2020 гг.), вклад турбулентного теплообмена варьируется от 15 до 33%
4. Предложена и верифицирована простая формула для оценки потока явного тепла.

Спасибо за внимание!



Благодарности

Автор выражает благодарность участникам Российской арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген ФГБУ «АНИИ» за помощь в организации и проведении полевых работ. Сотрудникам ФГБУ «АНИИ» — **Терехову А.В., Ромашовой К.В., Демидову В.Э., Иванову Б. В., Василевичу И.И.** А также сотрудникам ИФА РАН — **Шестаковой А. А., Нарижной А. И., Барскову К.В., Чечину Д.Г., Репиной И.А., Варенцову М.И., Артамонову А.Ю., Мамонтову А.Е., Шишову Е.Д.**

Оценка доли турбулентного теплообмена в структуре теплового баланса ледника Альдегонда выполнена в рамках темы 5.1 Плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг. «Развитие моделей, методов и технологий мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, океана, морского ледяного покрова, ледников и вечной мерзлоты (криосферы), процессов взаимодействия льда с природными объектами и инженерными сооружениями для Арктики и технологий гидрометеорологического обеспечения потребителей».

Эксперимент по сравнению результатов пульсационного и аэродинамического методов и обработка данных выполнены в рамках темы госзадания РАН 1022032200002-2-1.5.10.

Результаты: случаи увеличения турбулентных потоков в 2022 году (2)



	QM	QH	QLE	SWD	LWD
Melt flux (QM)	-	0,69	0,68	0,34	0,58
Sensible heat flux (QH)	0,69	-	0,59	-0,03	0,45
Latent heat flux (QLE)	0,68	0,59	-	-0,12	0,63
Downwelling short-wave radiation (SWD)	0,34	-0,03	-0,12	-	-0,31
Downwelling long-wave radiation (LWD)	0,58	0,45	0,63	-0,31	-

	Поток явного тепла		Поток скрытого тепла	
	Total dominance, dimensionless	Relative importance, %	Total dominance, dimensionless	Relative importance, %
Скорость ветра	0.50	65.9	0.01	2.7
Температура воздуха	0.24	31.0	0.24	49.2
Влажность воздуха	0.01	1.4	0.17	35.0
Атмосферное давление	0.01	1.3	0.05	9.8
Приходящая солнечная радиация	0.00	0.3	0.02	3.4