

ВКЛАД ФЁНОВОГО ЭФФЕКТА В ТАЯНИЕ ЛЕДНИКОВ ЗАЛИВА ГРЁНФЬОРД (ШПИЦБЕРГЕН) НА ПРИМЕРЕ СЛУЧАЯ 4–5 АВГУСТА 2025 Г.

© 2026 г. А. А. Шестакова^{1,2,*}, А. И. Нарижная¹, И. А. Репина¹, А. Д. Пашкин¹, А. Ю. Артамонов¹, А. Е. Мамонтов¹, А. В. Тимажев¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

²Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия

*e-mail: shestakova@ifaran.ru

Поступила в редакцию 07.10.2025 г.

После доработки 28.10.2025 г.

Принята к публикации 29.12.2025 г.

Рассмотрено воздействие фёна на тепловой баланс ледников залива Грёнфьорд (Западный и Восточный Грёнфьорд, Альдегонда) о. Западный Шпицберген. Фён — это мезомасштабная циркуляция, возникающая в результате взаимодействия крупномасштабного ветрового потока с горами, которая проявляется на подветренных склонах в виде сильного, порывистого и тёплого ветра. Наблюдения на леднике Западный Грёнфьорд выявили резкое увеличение турбулентного потока явного тепла во время фёна 4–5 августа 2025 г. Согласно расчётам с помощью аэродинамических формул, фён также привёл к увеличению потока скрытого тепла. В результате суммарный вклад турбулентного теплообмена в несколько раз превысил вклад радиационного баланса. Расчётная интенсивность таяния льда достигала 11 мм/ч, за сутки с фёном расчётный слой стаивания составил 10.6 см. Кроме того, для изучения влияния мезомасштабных циркуляций привлекались результаты численного моделирования атмосферы с высоким разрешением (400 м), которые хорошо согласуются с измеренным слоем стаивания в масштабе нескольких суток. Результаты моделирования показали, что среди окружающих ледников ледник Восточный Грёнфьорд более всего подвержен таянию под влиянием фёна.

Ключевые слова: фён, Шпицберген, абляция, турбулентные потоки

DOI: 10.7868/S2412376526010066

ВВЕДЕНИЕ

Фён — это метеорологическое явление, относящееся по своему генезису к классу подветренных бурь. Классический фён проявляется в виде сильного и порывистого ветра на подветренной стороне гор, который сопровождается резким повышением температуры воздуха и значительным уменьшением относительной влажности. Известно, что фёны могут вызывать дополнительное таяние снега и льда, оказывая значимое влияние на баланс массы ледников, как это было показано для фёнов на Антарктическом полуострове (Elvidge et al., 2020). На Новой Земле и в Гренландии более 80% случаев сильного таяния наблюдается именно при подветренных бурях (Mattingly et al., 2023; Naacker et al., 2024).

В работе (Shestakova et al., 2022) показано, что весенний случай фёна на Западном Шпицбергене привёл к преждевременному сходу снежного покрова. Ускоренное таяние снега стало следствием увеличения турбулентного тепло- и влагообмена, а также роста приходящей коротковолновой радиации в т.н. «фёновом окне». Фёновое окно — это прояснение на подветренной стороне гор, где наблюдается опускание воздуха, его адиабатическое нагревание и удаление от состояния насыщения. Дополнительное повышение температуры при фёне обеспечивается интенсивным вертикальным перемешиванием над горами. Оно приводит к подмешиванию более тёплого воздуха из вышележащего слоя приподнятой инверсии, которая очень часто наблюдается в Арктике.

В период экспедиционных работ Института физики атмосферы им. А.М. Обухова (ИФА РАН) на Шпицбергене летом 2025 г. зафиксирован яркий случай фёна. Скорость юго-восточного ветра в верхней зоне ледника Западный Грэнфьорд достигала в порывах 19 м/с (измерения проводились на высоте около 2 м над поверхностью), а температура воздуха повысилась на 8 °С за сутки. В целом на архипелаге фёны при ветрах восточных румбов отмечаются довольно часто, но имеют обычно небольшую продолжительность (менее суток), а скорость ветра не достигает таких значений, как, например, на Новой Земле. По данным метеостанции Нью-Олесунн (север Западного Шпицбергена), в среднем наблюдается 784 часа с подветренными бурями в год, а повышение температуры воздуха во время фёнов составляет в среднем 6 °С, достигая в отдельных случаях 14 °С (Shestakova et al., 2020). В Баренцбурге (центр Западного Шпицбергена) повторяемость фёнов значительно ниже: 119 ч/год, однако эффект повышения температуры проявляется сильнее, чем на севере, достигая в отдельных случаях 23 °С за сутки. В большинстве случаев фёны на Шпицбергене наблюдаются в холодное время года. Важно отметить, что, фёны выделялись исключительно по превышению пороговой скорости приземного ветра в заданном интервале румбов (Shestakova et al., 2020). Другие важнейшие характеристики фёнов (трёхмерная структура, характеристики натекающего потока, и др.) систематически не измеряются, поэтому реальная картина повторяемости этого явления может отличаться от приведённой. В связи с этим анализ отдельных случаев фёнов, наблюдаемых непосредственно на подветренных склонах гор, в особенности на ледниках в сезон абляции, — актуально как для понимания общей картины явления в этом районе, так и для оценки влияния таких экстремальных явлений на тепловой баланс ледников.

В работе исследуется влияние зафиксированного эпизода фёна на теплообмен атмосферы с поверхностью ледников в заливе Грэнфьорд (Альдегонда, Западный и Восточный Грэнфьорд). Используются данные наблюдений за метеорологическими параметрами и турбулентными потоками, выполненные сотрудниками ИФА РАН на леднике Западный Грэнфьорд, наблюдения за балансом массы ледника Восточный Грэнфьорд, предоставленные сотрудниками ИГ РАН, а также результаты моделирования теплового баланса и мезомасштабного моделирования атмосферы.

НАБЛЮДЕНИЯ НА ЛЕДНИКЕ ЗАПАДНЫЙ ГРЭНФЬОРД

В июле–августе 2025 г. Институт физики атмосферы РАН проводил измерения метеорологических параметров с помощью автоматических метеостанций (далее — АМС) в двух точках на леднике Западный Грэнфьорд на высоте 260 и 395 м над ур. моря. На одной из точек (далее — нижняя станция; рис. 1) на высоте около 1 м над поверхностью льда установлен акустический анемометр АМК-04 (производитель “Сибаналитприбор”, г. Томск). Прибор регистрировал три компоненты скорости ветра и температуру с частотой 80 Гц, характеристики влажности воздуха и атмосферное давление с дискретностью 1 мин. На другой точке (верхняя станция, см. рис. 1) установлена АМС Нобо (производитель Onset, США), которая записывала усреднённые за 1-минутный интервал значения температуры воздуха, относительной влажности, скорости и направления ветра, приходящей коротковолновой радиации, а также максимальные значения скорости за этот интервал (порывы). Датчики установлены на высоте 1.8 м над поверхностью, однако высота в течение периода измерений менялась из-за протаивания льда (штанга с датчиками была забурена в лёд).

Для расчёта турбулентных потоков была проведена первичная обработка данных акустического анемометра. Турбулентные пульсации выделялись методом удаления линейного тренда по различным интервалам (от 2 до 60 мин). Предварительно выполнены удаление выбросов и двумерная коррекция поворота осей. Также проводилась проверка стационарности турбулентности по методу (Foken, Wichura, 1996), периоды с нестационарной турбулентностью не рассматривались в работе. На основе полученных пульсаций выполнен расчёт потоков тепла и импульса с применением метода ковариации турбулентных пульсаций.

МЕЗОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для изучения пространственной картины влияния фёна на тепловой баланс ледников залива Грэнфьорд проведены численные эксперименты с мезомасштабной атмосферной моделью WRF-ARW. Для параметризации приземного и пограничного слоёв в модели применялась схема QNSE, специально разработанная для устойчивых погранслоёв (Sukogiansky et al., 2005). В качестве параметризации деятельного слоя суши

использовалась схема Noah-MP (Niu et al., 2011), которая позволяет задавать четыре слоя почвы/льда и три слоя снега. В экспериментах применялись три вложенные друг в друга области с горизонтальным шагом сетки 10, 2 и 0.4 км соответственно. В качестве начальных и граничных условий использовался реанализ ERA5, а также

данные о типах поверхности Global Land Cover Database (Global Land Cover Database..., 2025) с разрешением 100 м, данные типизации ландшафтов на основе спутниковых данных Sentinel (Sentinel-2 Land Cover Explorer..., 2025) с разрешением 20 м, данные о рельефе ASTER (ASTER DEM..., 2025) с разрешением 30 м.



Рис. 1. Карта-схема района исследований.

Красными точками обозначено положение двух метеостанций Института физики атмосферы РАН на леднике Западный Грэнфьорд, на врезках показаны их фотографии и обзорная карта центральной части Западного Шпицбергена. Топографическая основа TopoSvalbard (Норвежский полярный институт; TopoSvalbard — Norwegian Polar Institute..., 2025), границы ледников указаны по данным за 2008 г.

Fig. 1. Schematic map of the study area.

The red dots indicate the location of the two IAP RAS weather stations on the Vestre Grøn fjordbreen. The insets show photographs of the stations and an overview map of the central part of Spitsbergen. The topographic map is from TopoSvalbard (Norwegian Polar Institute; TopoSvalbard — Norwegian Polar Institute..., 2025), glacier boundaries are indicated according to data from 2008

ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЁНА ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕЗОМАСШТАБНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Эпизод юго-восточного фёна 4–5 августа 2025 г. наблюдался на фоне прохождения тёплого фронта циклона, центр которого располагался над Гренландским морем. В первой половине дня 4 августа наблюдалась преимущественно безоблачная погода, а в натекающем юго-восточном потоке на высоте 1–1.5 км отмечалось низкотропосферное струйное течение с максимальной скоростью 15–20 м/с, находившееся в слое приподнятой инверсии. Пик фёна пришёлся

на вечер 4 августа (рис. 2, *a*), когда юго-восточный ветер наблюдался во всей тропосфере. Согласно результатам моделирования и данным наблюдений на метеостанциях, усиление ветра наблюдалось на склонах северо-западной, западной и северной экспозиций по всему архипелагу (рис. 3, *a*). На метеостанциях Исфьорд-Радио, Лонгйир (аэропорт), Нью-Олесунн средняя скорость юго-восточного ветра на высоте 10 м над поверхностью достигала 16 м/с, в порывах до 25 м/с. На станции Баренцбург средняя скорость не превышала 10 м/с, однако наблюдалось очень сильное повышение температуры воздуха — до +17.9 °С. Рост приземной темпе-

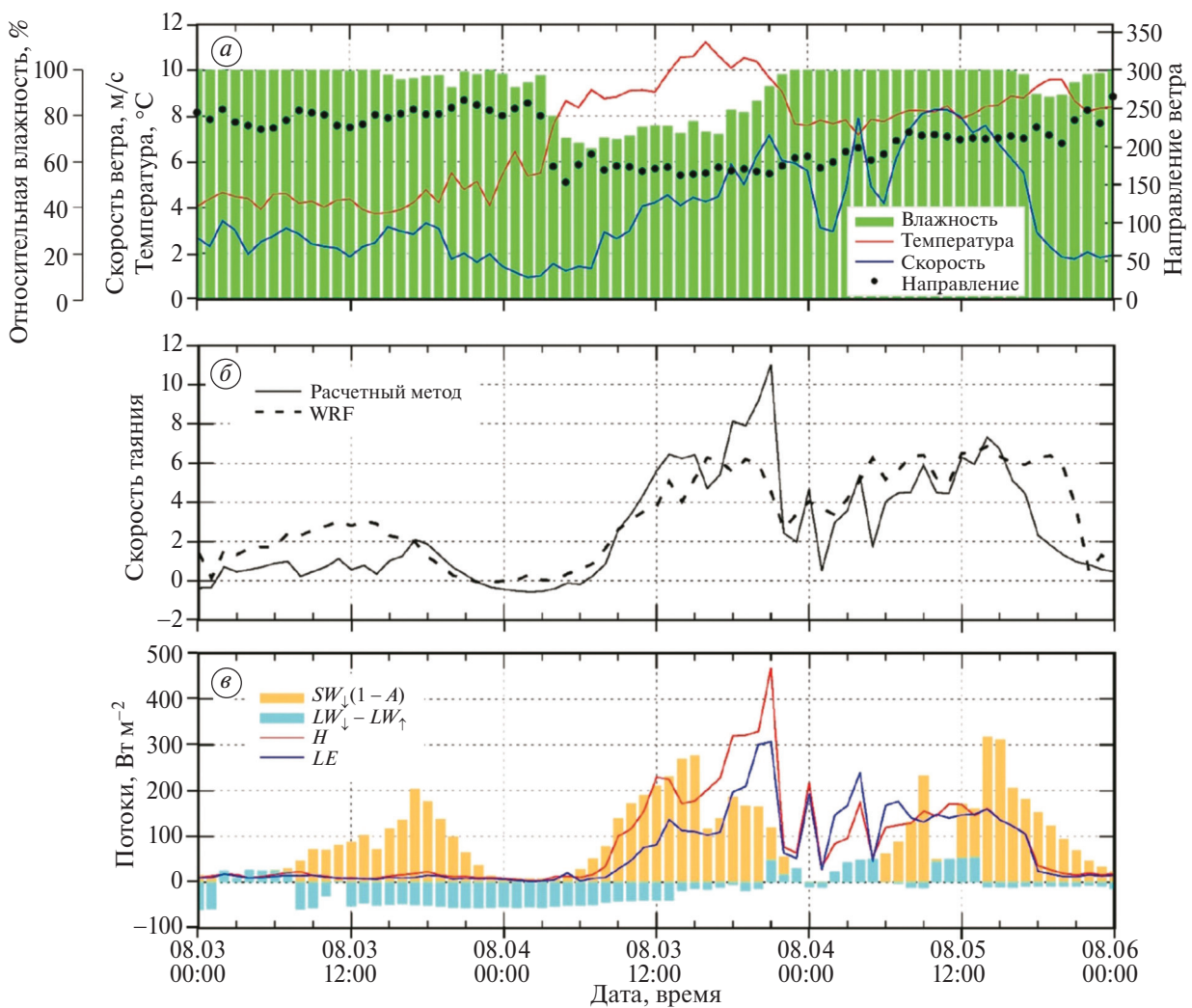


Рис. 2. Временной ход некоторых параметров на нижней станции в период 3–5 августа 2025 г.: метеорологические параметры по данным наблюдений (*a*), скорость таяния льда (мм/ч) по расчётному методу (сплошная линия) и по результатам мезомасштабной модели (пунктир) (*b*); компоненты теплового баланса (синтез данных наблюдений и результатов мезомасштабного моделирования, см. пояснения в тексте) (*c*)

Fig. 2. Time series of selected parameters at the lower station during the period 3–5 August 2025: Meteorological parameters from observations (*a*), ice melt rate (mm/h) derived from the calculation method (solid line) and from the mesoscale model results (dashed line) (*b*); heat budget components (synthesis of observational data and mesoscale modeling results, see explanations in the text) (*c*)

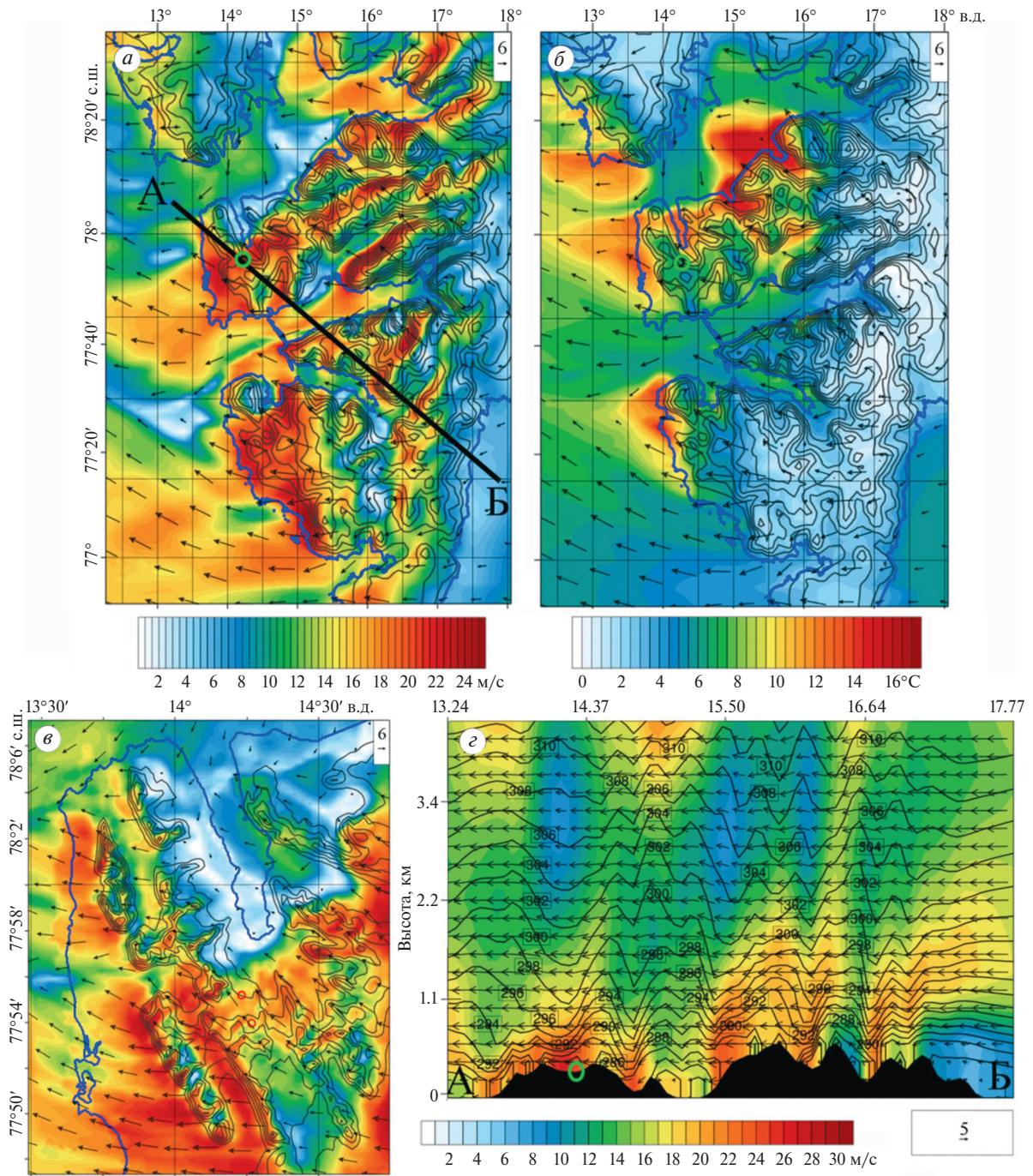


Рис. 3. Результаты мезомасштабного моделирования кульминации фёна в 17:00 4 августа: скорость ветра на уровне 10 м над поверхностью (а) и температура воздуха на нижнем модельном уровне во второй области моделирования (шаг сетки 2 км) (б); скорость ветра на уровне 10 м над поверхностью в третьей области моделирования (шаг сетки 400 м) (в); вертикальный разрез скорости ветра вдоль линии А–Б, обозначенной на рис. 3, а. (г). Шкала для рис. 3, а и в одинаковая. Направление и скорость ветра показаны векторами. Изолиниями на картах показана высота рельефа, через 100 м. Изолиниями на разрезе показана потенциальная температура. Зелёным кружком показано положение верхней части ледника Западный Грэнфьорд, красными кружками — положение метеостанций на леднике

Fig. 3. Results of mesoscale modeling of the foehn culmination at 17:00 on August 4: wind speed at a level of 10 m above the surface (a) and air temperature at the lowest model level in the second modeling domain (grid step 2 km) (б); wind speed at a level of 10 m above the surface in the third modeling domain (grid step 400 m) (в); vertical cross-section of wind speed along line A-B, indicated in Fig. 3, a. (г). The scale for Fig. 3, a and в is the same. Wind direction and speed are shown as vectors. Isolines on the maps show the topography elevation, every 100 m. Isolines on the cross-section show the potential temperature. The green circle shows the position of the upper part of the Vestre Grønfyordbreen, the red circles — the position of weather stations on the glacier

ратуры наблюдался с подветренной стороны от гор (см. рис. 3, б) и за сутки составил 10°C в Баренцбурге, $7\text{--}8^{\circ}\text{C}$ в Лонгйире и на станции Исфьорд-Радио, 4°C в Нью-Олесунне. На леднике Западный Грэнфьорд средняя скорость приземного ветра достигала 8 м/с на нижней станции и 12 м/с на верхней, с порывами до 19 м/с , а рост температуры за сутки составил 8°C на нижней станции и 4°C на верхней. Самый сильный фёновый эффект наблюдался не на самом леднике, относительно пологом, а на крутых склонах прилегающих хребтов, обращённых к западу (см. рис.3, в). При непосредственном прохождении фронта в ночь с 4 на 5 августа наблюдалась кучево-дождевая облачность, в Баренцбурге зафиксирована гроза, а направление ветра в натекающем потоке изменилось на южное, что привело к затуханию фёна. По результатам мезомасштабного моделирования, пик фёна также пришёлся на вечер 4 августа. Ось струи фёна в это время опустилась до высоты $100\text{--}300\text{ м}$ над поверхностью ледника и находилась в середине слоя мощной температурной инверсии толщиной около 700 м (см. рис.3, г). Согласно данным радиозондирования в Нью-Олесунне в середине дня 4 августа, струя юго-восточного ветра также располагалась в нижнем 300-метровом слое.

ОЦЕНКА СЛОЯ СТАИВАНИЯ НА ЛЕДНИКАХ ЗАЛИВА ГРЭНФЬОРД ВО ВРЕМЯ ФЁНА

Для оценки слоя стаивания льда применялось уравнение теплового баланса поверхности ледника:

$$SW_{\downarrow}(1 - A) + (LW_{\downarrow} - LW_{\uparrow}) + H + LE - G + Q_m = 0,$$

где SW_{\downarrow} — плотность потока приходящей коротковолновой радиации; A — интегральное альbedo поверхности; LW_{\uparrow} и LW_{\downarrow} — плотность потоков собственного излучения поверхности и встречного излучения атмосферы (компоненты баланса длинноволновой радиации), H и LE — турбулентные потоки явного и скрытого тепла, G — поток тепла в толще льда, Q_m — затраты тепла на таяние льда. Последний может быть рассчитан как остаточный член баланса. Слой стаивания в водном эквиваленте h (м) оценен следующим образом: $\partial h/\partial t = Q_m/(L_i \rho_i)$, где $L_i = 333.5\text{ кДж/кг}$ — удельная теплота плавления льда, а $\rho_i = 917\text{ кг м}^{-3}$ — плотность льда.

Для оценки влияния фёна на величину слоя стаивания на леднике Западный Грэнфьорд в точке нижней станции применены наблюден-

ные потоки явного тепла и приходящей коротковолновой радиации (последняя взята с верхней АМС, хотя радиационные условия на двух точках могут отличаться), а остальные потоки были рассчитаны. Измерения температуры поверхности в районе нижней станции 19, 21 июля и 7 августа с помощью портативного инфракрасного датчика показали значения, близкие к нулю. В связи с этим температура поверхности задана равной 0°C , а расчётное собственное излучение поверхности оставалось постоянным. Встречное излучение атмосферы взято из данных мезомасштабного моделирования в ближайшей к станции ячейке модели. Альbedo задано константой, равной 0.3 (характерное значение для чистого льда в сезон абляции). Кондуктивный поток тепла, направленный от поверхности в толщу льда (G), задан константой, равной 5 Вт м^{-2} (согласно характерным значениям (Hock, Holmgren, 1996)). Турбулентный поток скрытого тепла LE рассчитан по аэродинамической формуле. Для расчёта коэффициентов турбулентного обмена применялись измеренные на нижней станции значения скорости ветра, температуры воздуха и удельной влажности, а в качестве коэффициентов динамической и термической шероховатости — оценки этих величин, выполненные по данным пульсационных измерений для каждого срока. Во время фёна преобладали условия нейтральной стратификации, однако для случаев с устойчивой стратификацией для поправки коэффициентов обмена применялись функции, предложенные (Grachev et al., 2007), а для всех расчётов — осреднённые за 60 мин значения метеорологических параметров.

Результаты расчётов слоя стаивания на нижней станции представлены на рис. 2, б. В начале фёна, при ясном небе, доминирующую роль играл коротковолновый радиационный баланс. Во второй половине эпизода из-за увеличения облачности вклад коротковолнового баланса уменьшился, а длинноволновый радиационный баланс принимал положительные значения в ночные часы. Максимальная интенсивность таяния (11 мм/ч) совпала с кульминацией фёна вечером 4 августа и обеспечена в первую очередь турбулентными потоками тепла. Поток явного тепла достигал 467 Вт м^{-2} , поток скрытого — 307 Вт м^{-2} (см. рис. 2, в). Несмотря на дефицит относительной влажности поток скрытого тепла направлен от атмосферы к поверхности, что обусловлено адвекцией тёплого влажного воздуха. После завершения основного эпизода фёна (5 августа) интенсивное таяние продолжилось

вследствие сохраняющейся высокой скорости ветра за фронтом и продолжающейся адвекции тёплого и влажного воздуха.

В итоге за сутки фёна (06:00 4 августа — 05:00 5 августа) расчётный слой стаивания на нижней станции составил 10.6 см, что превышает максимальные значения экстремального таяния, зафиксированные в 2022 г. (Prokhorova et al., 2025). По данным мезомасштабного моделирования за тот же период в ближайшей к станции ячейке модели слой стаивания составил 9.8 см (рис. 4, б). Временной ход интенсивности таяния в модели существенно сглажен, для отдельных сроков наблюдаются расхождения, которые связаны с недооценкой моделью пиковых значений турбулентных потоков тепла. Одной из причин такой недооценки может быть заниженное значение параметра динамической шероховатости, которая в модели задаётся константой, равной 1 мм. Оценки этого параметра на основе прямых измерений во время фёна оказываются на порядок больше. Однако учитывая сложность рельефа, комплексность явления

и известную неспособность моделей точно воспроизводить экстремальные явления, общее согласие с расчётами на основе наблюдений оценивается как хорошее (см. рис.2, б).

Таблица содержит значения слоя стаивания, полученные разными методами для двух периодов: 30 июля—7 августа (для которого доступны измерения по гляциологическим рейкам на леднике Восточный Грэнфьорд) и за сутки с фёном. Мезомасштабная модель показала очень близкие оценки таяния не только к расчётам для Западного Грэнфьорда, но и непосредственно к наблюдениям на Восточном Грэнфьорде (см. рис. 4, а и таблицу). По результатам мезомасштабного моделирования вклад фёна в суммарное таяние за 8 суток наибольший на Восточном Грэнфьорде (до 27%) и наименьший на леднике Альдегонда (до 22%) (см. рис. 4, в). Эти различия объясняются расположением ледников относительно натекающего потока: Восточный Грэнфьорд находится непосредственно на подветренном склоне, где скорость ветра максимальная, в то время как ледник Альдегонда расположен существенно “ниже по потоку” и имеет восточную экспозицию.

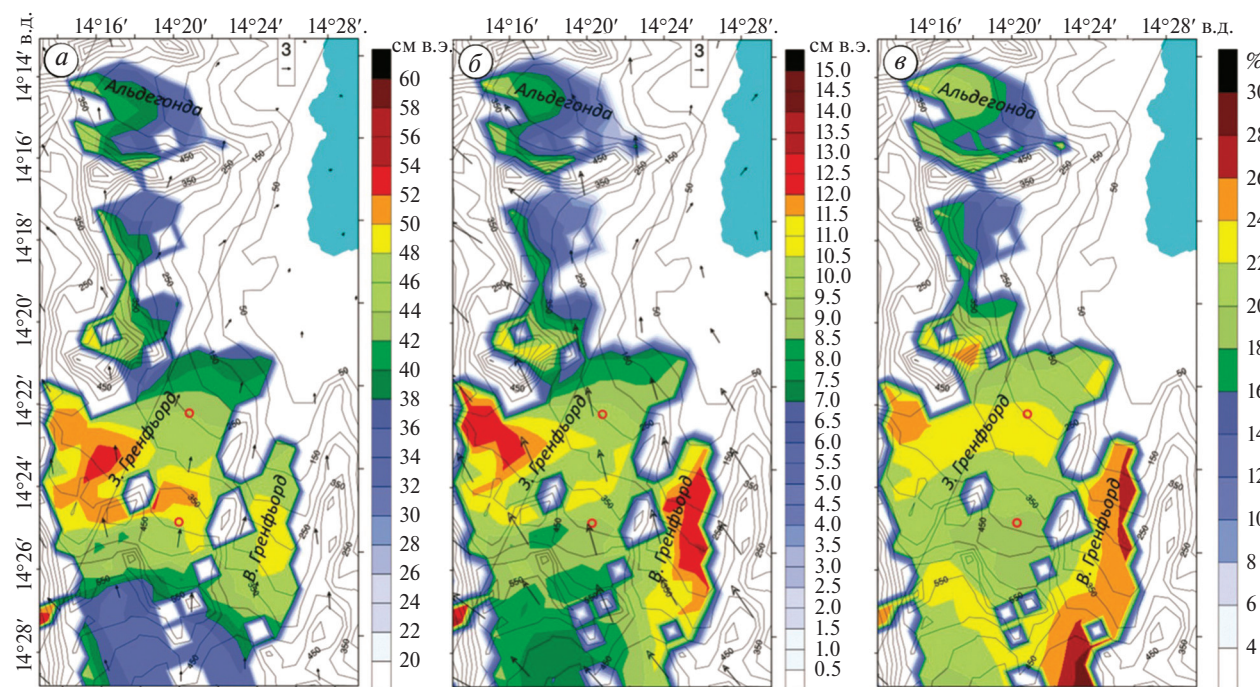


Рис. 4. Суммарный слой стаивания за период 30 июля—7 августа (а) и сутки с фёном (б), вклад суток с фёном в суммарное таяние за 8 суток (в) по результатам мезомасштабного моделирования. Векторами показано среднее поле ветра за рассматриваемые периоды (вверху показано вектор, соответствующий скорости 3 м/с для масштаба), изолиниями — высота рельефа (интервал 50 м). Красными кружками отмечено положение метеостанций

Fig. 4. Total melt depth for the period July 30—August 7 (a) and for the 24-hour foehn event (б), the contribution of the foehn day to the total 8-day melt (в), based on mesoscale modeling results. Vectors indicate the mean wind field for the corresponding periods (a reference vector corresponding to a wind speed of 3 m/s is shown on the top), and isolines show the topography elevation (50 m contour interval). Red circles mark the location of the weather stations

Таблица. Слой стаивания (в см в.э.) по данным наблюдений и моделирования**Table.** Melt depth (water equivalent, cm) derived from observations and model simulations

Ледник	Период	Наблюдения (среднее по леднику)	Расчётный метод (в точке станции)	Мезомасштабное моделирование (среднее по леднику и в точке станции)
Западный Грёнфьорд	30 VII–7 VIII	-	44	35–53 (в точке станции 44)
	Фён	-	10.6	7–12.5 (в точке станции 9.8)
Восточный Грёнфьорд	30 VII–7 VIII	48	-	38–50
	Фён	-	-	9–13
Альдегонда	30 VII–7 VIII	-	-	25–46
	Фён	-	-	4–11

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных наблюдений и результатов моделирования выявил резкое усиление турбулентных потоков тепла во время эпизода фёна на Шпицбергене. Это привело к экстремальному таянию льда на ледниках залива Грёнфьорд, при этом интенсивность таяния превысила максимальные для этого района значения, представленные в литературе (Prokhorova et al., 2025). Усиление таяния произошло не только за счёт роста потока явного тепла. Важную роль сыграло увеличение потока скрытого тепла, вызванное адвекцией очень тёплого и влажного воздуха. Данный вывод согласуется с результатами работ (Mattingly et al., 2023; Naacker et al., 2024), в которых максимальное таяние ледников обнаружено при сочетании фёнового эффекта и сильной адвекции водяного пара. Это отличает исследуемый эпизод фёна от рассмотренного в (Shestakova et al., 2022) эпизода фёна в мае 2017 г., когда основной вклад в таяние снега вносило увеличение приходящей коротковолновой радиации, а поток скрытого тепла был направлен в противоположную сторону, от поверхности к атмосфере. Основная причина таких различий — разное направление адвекции воздуха: по сравнению с рассмотренным эпизодом, в эпизоде 2017 г. направление ведущего потока было северо-восточным и происходила адвекция более сухого и холодного воздуха (Shestakova et al., 2022).

В дальнейшем важно оценить вклад фёнов различных направлений в таяние ледников Шпицбергена на масштабах всего сезона абляции. С этой целью планируется привлечение большего объёма данных наблюдений для детального изучения роли фёнового эффекта в таянии ледников в данном районе, а также разработка эффективного индекса для выявления фёнов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность ГТ “Арктикуголь” в лице гендиректора И.А. Неверова и главного инженера Р.Р. Сафина, сотрудникам ААНИИ А.Л. Никулиной, В.Н. Чуруну, В.Ю. Крутицкому, У.В. Прохоровой, И.Д. Коблашову, сотрудникам Института географии РАН П.А. Торопову и Н.Э. Елагиной, а также начальнику базы Кольского научного центра РАН В.Г. Кулешову за всестороннюю помощь в проведении экспедиционных работ.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки, госзадание 17.1 (мезомасштабное моделирование случая фёна), экспедиционные работы проводились в рамках госзадания № 125020501525-6.

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the Trust Arktikugol (represented by General Director I.A. Neverov and Chief Engineer R.R. Safin), as well as to V.G. Kuleshov, Head of the FRC KSC RAS base, for their comprehensive organizational and technical support during the fieldwork. We are also thankful to the staff of the AARI (A.L. Nikulina, V.N. Churun, V.Yu. Krutitskiy, U.V. Prokhorova and I.D. Koblashov) and IG RAS (P.A. Toropov and N.E. Elagina) for their valuable support and cooperation throughout the expedition.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Minobrnauki) under state assignment No. 17.1 (for the mesoscale modeling of the foehn case), and the fieldwork was conducted within the framework of state assignment No. 125020501525-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ASTER DEM // Электронный ресурс. URL: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpdaac-ecs-ast14dem-003> (Дата обращения: 05.10.2025).

- Elvidge A.D., Munneke P.K., King J.C., Renfrew I.A., Gilbert E.* Atmospheric Drivers of Melt on Larsen C Ice Shelf: Surface Energy Budget Regimes and the Impact of Foehn // *Journ. of Geophys. Research. Atmosphere*. 2020. № 125. e2020JD032463. <https://doi.org/10.1029/2020JD032463>
- Foken T., Wichura B.* Tools for Quality Assessment of Surface-Based Flux Measurements // *Agricultural and Forest Meteorology*. 1966. V. 78. № 1–2. P. 83–105. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02248-1](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02248-1)
- Global Land Cover Database // Электронный ресурс. URL: <https://zenodo.org/records/3518036> (Дата обращения: 05.10.2025).
- Grachev A.A., Andreas E.L., Fairall C.W., Guest P.S., Persson, P.O.G.* SHEBA Flux-Profile Relationships in the Stable Atmospheric Boundary Layer // *Boundary-layer meteorology* 2007. V. 124. № 3. P. 315–333. <https://doi.org/10.1007/s10546-007-9177-6>
- Haacker J., Wouters B., Fettweis X., Glissenaar I.A., Box J.E.* Atmospheric-River-Induced Foehn Events Drain Glaciers on Novaya Zemlya // *Nature Communications*. 2024. V. 15. № 1. P. 7021. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51404-8>
- Hock R., Holmgren B.* Some Aspects of Energy Balance and Ablation of Storglaciären, Northern Sweden // *Geografiska Ann.: Ser. A. Physical Geography*. 1996. V. 78. № 2–3. P. 121–131. <https://doi.org/10.1080/04353676.1996.11880458>
- Mattingly K.S., Turton J.V., Wille J.D., Noël B., Fettweis X., Rennermalm Å.K., Mote T.L.* Increasing Extreme Melt in Northeast Greenland Linked to Foehn Winds and Atmospheric Rivers // *Nature Communications*. 2023. V. 14. № 1. P. 1743. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37434-8>
- Niu G.Y., Yang Z.L., Mitchell K.E., Chen F., Ek M.B., Barlage M., Kumar A., Manning K., Niyogi D., Rosero E., Tewari M., Xia Y.* The Community Noah Land Surface Model with Multiparameterization Options (Noah–MP): 1. Model Description and Evaluation with Local-Scale Measurements // *Journal of Geophys. Research*. 2011. V. 116. D12109. <https://doi.org/10.1029/2010JD015139>
- Prokhorova U.V., Terekhov A.V., Demidov V.E., Romashova K.V., Barskov K.V., Chechin D.G., Vasilevich I.I., Tretiakov M.V., Ivanov B.V., Repina I.A., Verkulich, S.R.* Impact of Extreme Weather Events on the Surface Energy Balance of the Low-Elevation Svalbard Glacier Aldegondabreen // *Water*. 2025. V. 17. № 2. P. 274. <https://doi.org/10.3390/w17020274>
- Shestakova A.A., Chechin D.G., Lüpkes C., Hartmann J., Maturilli M.* The Foehn Effect During Easterly Flow over Svalbard // *Atmosphere Chem. Physics*. 2022. V. 22. P. 1–20. <https://doi.org/10.5194/acp-22-1-2022>
- Sentinel-2 Land Cover Explorer // Электронный ресурс. URL: <https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer> (Дата обращения: 05.10.2025).
- Shestakova A.A., Toropov P.A., Matveeva T.A.* Climatology of Extreme Downslope Windstorms in the Russian Arctic // *Weather and Climate Extremes*. 2020. V. 28. 100256. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100256>
- Sukoriansky S., Galperin B., Perov V.* Application of a New Spectral Theory of Stably Stratified Turbulence to the Atmospheric Boundary Layer over Sea Ice // *Boundary-Layer Meteorology*. 2005. V. 117. P. 231–257. <https://doi.org/10.1007/s10546-004-6848-4>
- ТопоSvalbard — Norwegian Polar Institute // Электронный ресурс. URL: <https://toposvalbard.npolar.no> (Дата обращения: 05.10.2025).

Citation: Shestakova A.A., Narizhnaya A.I., Repina I.A., Pashkin A.D., Artamonov A.Y., Mamontov A.E., Timazhev A.V. The Role of the Foehn Effect in the Glacier Melting in Grøn fjorden (Spitsbergen): A Case Study of 4–5 August 2025. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2026, 66 (1): 81–90. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376526010066

The Role of the Foehn Effect in the Glacier Melting in Grøn fjorden (Spitsbergen): A Case Study of 4–5 August 2025

© 2026 A. A. Shestakova^{a,b,#}, A. I. Narizhnaya^a, I. A. Repina^a, A. D. Pashkin^a, A. Y. Artamonov^a, A. E. Mamontov^a, A. V. Timazhev^a

^aA.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

^bMoscow Center for Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, Russia

[#]e-mail: shestakova@ifaran.ru

Received October 7, 2025 / revised October 28, 2025 / accepted December 29, 2025

This study examines the influence of the foehn effect on a heat budget of glaciers in Grøn fjord Bay on Spitsbergen. Observations on the Vestre Grøn fjordbreen (West Grøn fjord Glacier) revealed a sharp increase in the turbulent sensible heat flux during a foehn occurred on August 4–5, 2025. According to calculations

using aerodynamic formulas, the foehn also increased the flux of a latent heat. As a result, the total contribution of the turbulent heat exchange was several times larger than the contribution of the radiation balance. The estimated ice melting rate reached 11 mm/h, while the calculated melting layer was equal to 10.6 cm per day with the foehn. In addition, to study the effect of mesoscale circulations, the results of high-resolution (400 m) numerical modeling of the atmosphere were used, and these were in a good agreement with the measured melting layer on a scale of several days. The simulation results showed that among the surrounding glaciers, the Austre Grønfyordbreen (East Grønfyord Glacier) is the most susceptible to melting under the influence of a foehn.

Keywords: foehn, Svalbard, ablation, turbulent fluxes

REFERENCES

- ASTER DEM: Electronic data. Retrieved from: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpdaac-ecs-ast14dem-003> (Last access: October 5, 2025).
- Elvidge A.D., Munneke P.K., King J.C., Renfrew I.A., Gilbert E.* Atmospheric Drivers of Melt on Larsen C Ice Shelf: Surface Energy Budget Regimes and the Impact of Foehn. *Journ. of Geophys. Research. Atmosphere.* 2020, 125: e2020JD032463. <https://doi.org/10.1029/2020JD032463>
- Foken T., Wichura B.* Tools for Quality Assessment of Surface-Based Flux Measurements. *Agricultural and Forest Meteorology.* 1966, 78 (1–2): 83–105. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02248-1](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02248-1)
- Global Land Cover Database: Electronic data. Retrieved from: <https://zenodo.org/records/3518036> (Last access: October 5, 2025).
- Grachev A.A., Andreas E.L., Fairall C.W., Guest P.S., Persson, P.O.G.* SHEBA Flux-Profile Relationships in the Stable Atmospheric Boundary Layer. *Boundary-Layer Meteorol.* 2007, 124 (3): 315–333. <https://doi.org/10.1007/s10546-007-9177-6>
- Haacker J., Wouters B., Fettweis X., Glissenaar I.A., Box J.E.* Atmospheric-River-Induced Foehn Events Drain Glaciers on Novaya Zemlya. *Nature Communications.* 2024, 15 (1): 7021. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51404-8>
- Hock R., Holmgren B.* Some Aspects of Energy Balance and Ablation of Storglaciaren, Northern Sweden. *Geografiska Annaler: Ser. A. Physical Geography.* 1996, 78 (2–3): 121–131. <https://doi.org/10.1080/04353676.1996.11880458>
- Mattingly K.S., Turton J.V., Wille J.D., Noël B., Fettweis X., Rennermalm Å.K., Mote T.L.* Increasing Extreme Melt in Northeast Greenland Linked to Foehn Winds and Atmospheric Rivers. *Nature Communications.* 2023, 14 (1): 1743. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37434-8>
- Niu G.Y., Yang Z.L., Mitchell K.E., Chen F., Ek M.B., Barlage M., Kumar A., Manning K., Niyogi D., Rosero E., Tewari M., Xia Y.* The Community Noah Land Surface Model with Multiparameterization Options (Noah–MP): 1. Model Description and Evaluation With Local-Scale Measurements. *Journal of Geophys. Research.* 2011, 116: D12109. <https://doi.org/10.1029/2010JD015139>
- Prokhorova U.V., Terekhov A.V., Demidov V.E., Romashova K.V., Barskov K.V., Chechin D.G., Vasilevich I.I., Tretiakov M.V., Ivanov B.V., Repina I.A., Verkulich S.R.* Impact of Extreme Weather Events on the Surface Energy Balance of the Low-Elevation Svalbard Glacier Aldegondabreen. *Water.* 2025, 17 (2): 274. <https://doi.org/10.3390/w17020274>
- Shestakova A.A., Chechin D.G., Lüpkes C., Hartmann J., Maturilli M.* The Foehn Effect During Easterly Flow over Svalbard. *Atmos. Chem. Phys.* 2022, 22: 1–20. <https://doi.org/10.5194/acp-22-1-2022>
- Sentinel-2 Land Cover Explorer: Electronic data. Retrieved from: <https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/> (Last access: October 5, 2025).
- Shestakova A.A., Toropov P.A., Matveeva T.A.* Climatology of Extreme Downslope Windstorms in the Russian Arctic. *Weather and Climate Extremes.* 2020, 28: 100256. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100256>
- Sukoriansky S., Galperin B., Perov V.* Application of a New Spectral Theory of Stably Stratified Turbulence to the Atmospheric Boundary Layer over Sea Ice. *Boundary-Layer Meteorology.* 2005, 117: 231–257. <https://doi.org/10.1007/s10546-004-6848-4>
- TopoSvalbard — Norwegian Polar Institute: Electronic data. Retrieved from: <https://toposvalbard.npolar.no> (Last access: October 5, 2025).