

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ СРЕДНЕЙ ВЫСОТЫ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ЛЕДНИКЕ АЛЬДЕГОНДА (ШПИЦБЕРГЕН)

© 2023 г. А. В. Терехов^{1,*}, И. И. Василевич¹, У. В. Прохорова¹

¹ Арктический и антарктический НИИ, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: antonyterekhov@gmail.com

Поступила в редакцию 27.03.2023 г.

После доработки 05.05.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

Предложен метод оценки относительной погрешности средней высоты снежного покрова, получаемой на архипелаге Шпицберген по снегомерным съёмкам. Уравнение для оценки погрешности включает в качестве предикторов плотность промеров на единицу площади и коэффициент вариации высоты снега. Уравнение получено на основе результатов применения статистического метода бутстрэп к набору данных снегомерных съёмок 2015–2021 гг. на леднике Альдегонда.

Ключевые слова: снегомерная съёмка, оценка погрешности, бутстрэп, высота снежного покрова, Шпицберген, Арктика

DOI: 10.31857/S2076673423030122, **EDN:** DIMCDV

ВВЕДЕНИЕ

Высота снежного покрова – важнейший гидрологический показатель. В умеренных и высоких широтах эта величина, наряду с плотностью снега, определяет высоту половодья, влияет на динамику промерзания и протаивания грунта, регулирует тепловой баланс земной поверхности за счёт изменения её альбедо. Ежегодные измерения высоты снежного покрова важны также с точки зрения мониторинга климатических изменений. Так, для всего района Баренцева моря и для архипелага Шпицберген в частности, показано, что тренды потепления воздуха гораздо более выражены для зимнего периода, нежели для летнего. Это приводит к сокращению количества дней с отрицательной температурой за сезон и к учащению зимних оттепелей, что негативно сказывается на снегонакоплении (Isaksen et al., 2022).

Высота снежного покрова плохо поддаётся площадной экстраполяции и моделированию на основе данных натурных измерений. Показано, что изменение величины твёрдых осадков в пространстве происходит нелинейно: например, коэффициенты корреляции Пирсона между снегонакоплением на ледниках Шпицбергена и рядами ближайших метеостанций, как правило, невысоки (Hagen et al., 1990; Terekhov et al., 2022). Кроме того, при измерении количества твёрдых осадков на метеостанциях существуют технические сложности: известно, что осадкомеры систематически хуже “ловят” твёрдые осадки, что может исказить реальную картину при изменении

соотношения доли жидких и твёрдых осадков (Førland, 2000). Также вызывает сомнения однородность рядов, полученных на метеостанциях, где имел место перенос измерительных площадок или смена осадкомерного прибора (Urazgildeeva et al., 2017; Hanssen-Bauer et al., 2019).

В результате, традиционные снегомерные съёмки, проводимые непосредственно в бассейнах исследуемых водотоков и на ледниках, по-прежнему остаются актуальным методом измерений. Несмотря на существенный прогресс последних десятилетий в дистанционных методах, позволивший использовать для реалистичной оценки определения высоты снежного покрова не только георадары (Лаврентьев и др., 2018; Василевич, Чернов, 2018; Nowak et al., 2021), но и пассивные радиометры микроволнового диапазона различных видов базирования: наземного (Dai et al., 2022), воздушного (Brucker, Markus, 2013), и спутникового (Kelly, 2009), непосредственные измерения высоты и плотности снежного покрова по-прежнему играют большую роль при изучении географической системы и используются в качестве эталона для валидации дистанционных методов.

С практической точки зрения на Шпицбергене наибольший интерес представляет средняя на водосбору или леднику высота снежного покрова. Из-за климатических особенностей архипелага основная доля осадков выпадает в зимний сезон, поэтому именно снеготпасы на водосборе служат главным элементом приходной части водного

баланса рек, определяя их годовой сток (Ромашова и др., 2019; Nowak et al., 2020). Кроме того, средний по ледникам запас воды в снеге представляет собой важнейший компонент баланса массы, тождественный показателю зимнего баланса. Вследствие этого важно иметь методику для оценки погрешности средней по водосбору высоты снежного покрова.

Под влиянием метеорологических факторов и рельефа местности снежный покров распределяется по поверхности неравномерно. Поэтому количество и расположение точек снегомерной съёмки на исследуемой территории влияют на точность итоговых средних значений высоты снега (Galos et al., 2017). Авторы предпринимают попытку вывести эмпирические закономерности, позволяющие количественно оценить, каким образом схема проведения снегомерной съёмки влияет на погрешность определения среднего по леднику значения высоты снежного покрова. Выявленные закономерности, во-первых, позволяют оптимизировать объёмы и схему будущих полевых работ, т.е. снегомерную съёмку, и, во-вторых, дадут возможность ретроспективно оценить погрешность значений в уже имеющихся многолетних мониторинговых рядах.

Исходная гипотеза исследования заключается в следующем: погрешность среднего по леднику значения высоты снега будет зависеть как от плотности покрытия территории измерениями, так и от показателя неоднородности снежного покрова. В качестве количественной оценки неоднородности предлагается использовать известный показатель – коэффициент вариации снежного покрова (C_v). Ожидается, что в результате проверки гипотез будет найдено оптимальное количество точек измерений, выше которого погрешность искомой величины не будет существенно снижаться, и, следовательно, дальнейшее увеличение программы снегомерной съёмки нецелесообразно.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект изучения и материалы снегомерных съёмок. Альдегонда (77.97° с.ш., 14.10° в.д.) – горнодолинный ледник, расположенный на острове Западный Шпицберген примерно в 10 км к юго-западу от населённого пункта Баренцбург (рис. 1). По состоянию на конец 2019 г. ледник занимал диапазон высот от 140 до 650 м над ур. моря и имел площадь около 5.3 км^2 (Борисик и др., 2021).

На поверхности ледника и на его морене ежегодно проводятся мониторинговые снегомерные съёмки для определения влагозапаса снежного покрова. Работы выполняются в период максимального снегонакопления, то есть в середине–конце апреля. Методика снегомерных съёмок ос-

новывается на принятых в Росгидромете руководящих документах (Наставление..., 1985; Руководство..., 1991) и представляет собой площадную снегомерную съёмку с квазирегулярной сетью (рис. 2). Точки измерения высоты снежного покрова располагаются в виде шести параллельных линий каждые 400–500 м перпендикулярно основному направлению долины ледника, среднее расстояние между точками в линии составляет 300 м. При технической возможности, измерения высоты снежного покрова также выполнялись вне ледника на его морене, чтобы избежать экстраполяции результатов. Плотность снежного покрова измеряется в шурфах, расположенных в верхней, средней и нижней частях ледника, распределённых равномерно по его ширине. Вместе с измерением плотности производится описание стратификации снежного покрова. Высота снежного покрова в каждой точке измеряется лавинным шупом и соответствует среднему арифметическому из трёх измерений, производимых в радиусе одного метра. Измерение плотности производится интегрально при помощи снегомера ВС-43.

Исходные данные снегомерных съёмок, для которых сохранились точные координаты всех измерений, необходимые для дальнейших расчётов, доступны авторам за шесть балансовых лет, с 2015 по 2021 г. Сезон 2020 г. исключен из расчётов, поскольку в этот год программа полевых работ была существенно сокращена из-за пандемии COVID-19.

Поскольку измерения стандартных снегомерных съёмок достаточно разрежены, для более подробного изучения изменчивости снежного покрова на мелких масштабах, порядка десяти метров, авторами также использованы профили высоты снега, полученные на леднике Альдегонда в 2021 г. с помощью георадара Пикор-Лед (Пикор-2) с центральной частотой 1700 МГц и заявленной точностью измерений 1–2 см. Координатную привязку во время полевых работ выполняли с помощью выносного USB GPS-Glonass приёмника.

Оценка погрешности методом бутстрэп. Бутстрэп – метод непараметрической статистики, применяемый, когда генеральная совокупность исследуемой величины и форма её распределения неизвестны (Efron, 1979). Применительно к задаче данного исследования подобной неизвестной генеральной совокупностью служит реальное распределение высоты снежного покрова по территории, во всей своей детальности. Доступные для анализа точечные измерения высоты снега, получаемые в ходе снегомерных съёмок, представляют собой лишь *выборки*. Метод бутстрэп заключается во многократной генерации случайных псевдовыборок из имеющихся данных измерений

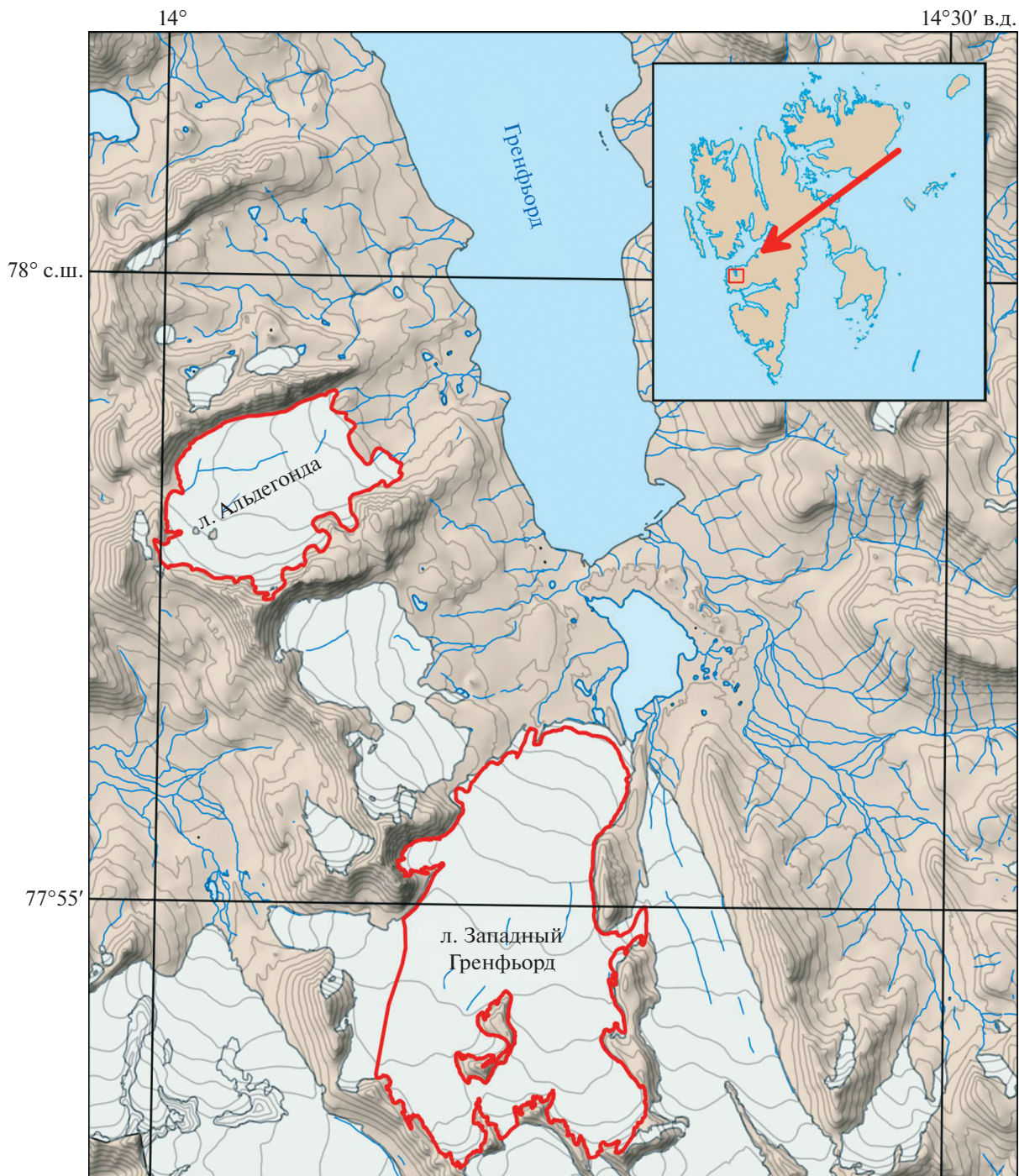


Рис. 1. Расположение ледников Альдегонда и Западный Грөнфьорд на территории Шпицбергена.
Fig. 1. Location of the Aldegondabreen and the Vestre Grøn fjordbreen glaciers on Svalbard.

и исследовании характеристик полученного эмпирического распределения вместо недоступной генеральной совокупности (Шитиков, Розенберг, 2013). Таким образом на множестве псевдовыборок можно оценить разные статистики исследуемой величины: доверительные интервалы, дисперсию, квантили и т.д.

В данной работе алгоритм на основе метода бутстрэп был реализован следующим образом: проведена интерполяция измеренных значений высоты снежного покрова, в результате чего были получены растры, которые далее были приняты за истинное распределение величины; смоделировано проведение снегомерной съёмки по ква-

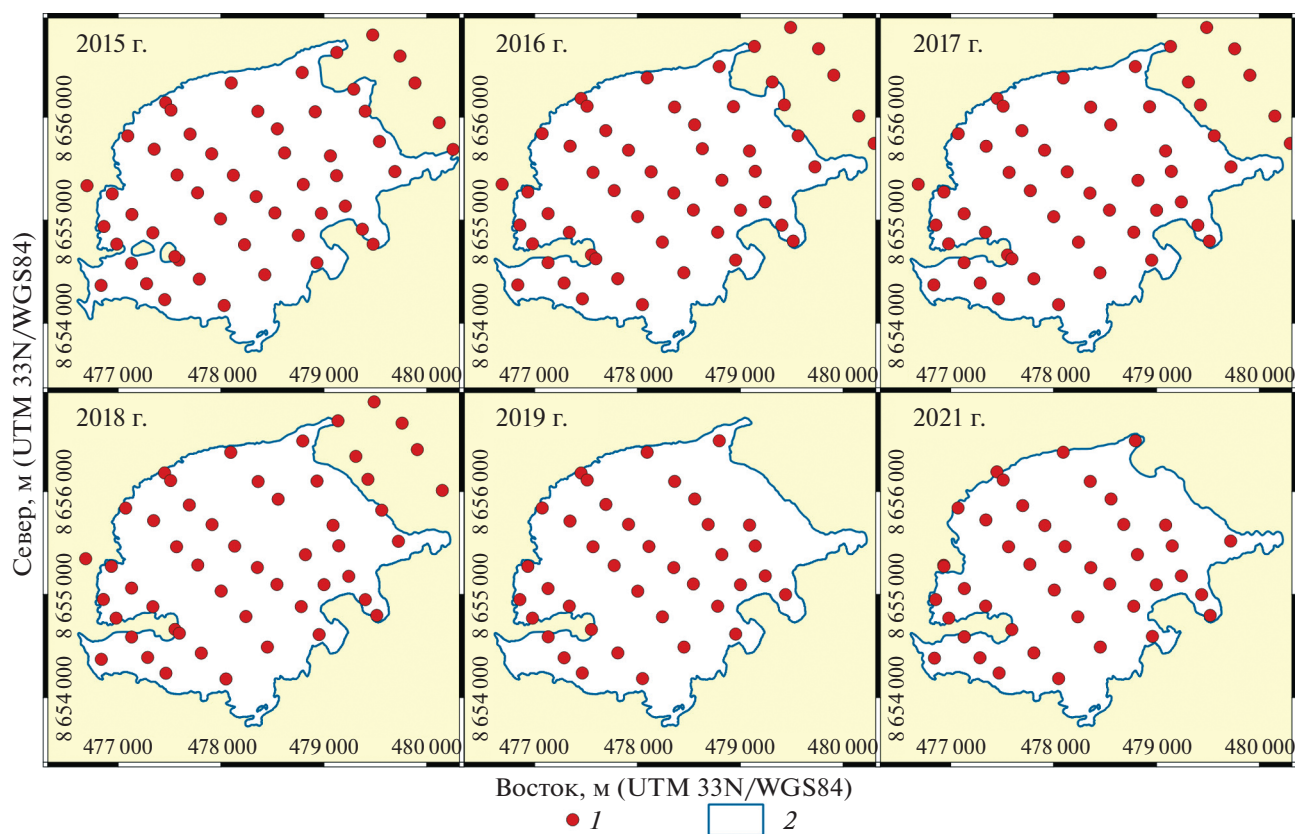


Рис. 2. Схема весенних снегомерных съёмок на леднике Альдегонда в 2015–2021 гг.: 1 – точки измерения высоты снега; 2 – контуры ледника на соответствующий год.

Fig. 2. Layout of snow depth measurements on Aldegondabreen in 2015–2021: 1 – snow depth measurement points; 2 – glacier outline.

зирегулярной сетке, с апробацией полученных растров необходимым количеством точек “измерений”. Процесс был повторен тысячу раз, на каждой итерации точки сдвигались на некоторое случайное значение, после чего рассчитывалось среднее по точкам значение высоты снежного покрова; по завершению итеративного процесса опробования, рассчитывалась средняя квадратическая ошибка (далее – СКО) из тысячи приёмов относительно своего “истинного”, полученного по растру значения. Это значение и принималось итоговой случайной погрешностью для данного числа точек снегомерной съёмки; далее, вся процедура повторялась для разного числа измерений и для каждого года, за который имеются полевые данные.

Пошаговая реализация алгоритма. 1. В качестве первого шага необходимо интерполировать реальные измерения высоты снега в растры, которые далее будут приниматься за истинные распределения на конкретный год. Выбор размера пикселя для интерполяции растра – дискуссионный вопрос, поскольку реальный масштаб пространственной изменчивости высоты снега может

быть неизвестен. Поскольку наиболее подробные данные о мелкомасштабной изменчивости этой величины, имеющиеся у авторов, имеют пространственную дискретность 10 м, то именно это число и было выбрано в качестве размера пикселя.

2. Чтобы смоделировать снегомерную съёмку с n точек на водосборе или леднике площадью A , необходимо распределить точки таким образом, чтобы на каждую приходилось в среднем A/n единиц площади. Для того, чтобы распределение было равномерным, территорию необходимо разделить на квадраты с размером стороны $\sqrt{A/n}$, и поместить точки измерений в центры этих квадратов, получив строго регулярную сетку. В реальности такую схему отбора выдержать едва ли возможно, и измерения выполнялись с некоторым сдвигом относительно идеальной схемы.

3. Далее, точки “измерений” при каждой итерации сдвигаются случайным образом относительно своих центральных позиций. При этом необходимо проконтролировать, чтобы точки гарантированно попадали внутрь “своих” ячеек, тем самым не нарушая регулярности схемы отбора. Одним из возможных путей обеспечить это

является генерация величины сдвига по нормальному распределению, принимая его стандартное отклонение равным $1/5$ от “радиуса” ячейки, то есть от $\sqrt{A/n}/2$. Операция расстановки точек по леднику повторяется тысячу раз.

4. На каждом шаге, во время опробования растров случайными точками, моделируется влияние мелкомасштабной изменчивости снежного покрова, полученное эмпирически по данным георадарной съёмки снежного покрова. Для этого в процесс сэмпинга вносятся незначительные отклонения от значений в ячейках растра, сгенерированные в соответствии с нормальным распределением со стандартным отклонением, полученным непосредственно из данных наблюдений и равным 8 см. Этот шаг необходим, поскольку растры, используемые в качестве “истинных” распределений высоты снега, были получены на основе разреженных данных и отражают реальную картину в сглаженном виде.

5. На каждой из тысячи итераций рассчитывается средняя толщина снега по точкам, как если бы это были результаты реальной снегомерной съёмки. Далее следует оценка того, насколько результат отличается от “истинного” значения — среднего по растру.

6. Пункты 1–5 повторяются для другого количества точек снегомерной съёмки. Для каждого количества точек рассчитывается СКО из тысячи смоделированных значений относительно растра. Это значение и принимается за случайную погрешность для данного числа точек измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изменчивость высоты снега в микромасштабе.

Одним из основных недостатков при применении предложенного подхода оценки погрешности средней высоты снега для ледника Альдегонда является тот факт, что растры “истинного распределения” снежного покрова по леднику были получены на основе сильно разреженных точек снегомерной съёмки, расстояние между которыми составляет 300–500 м. Это означает, что проинтерполированные авторами растры представляют лишь сглаженную картину истинного распределения, и не могут отражать изменчивость высоты снега на мелких масштабах, порядка метров. В то же время, во время итеративного сдвига точек моделируемых “снегомерных съёмок” важно эту изменчивость учесть.

Шаг между точками георадарного профиля на леднике Альдегонда составил в 2021 г. около 10 м, что гораздо детальнее стандартных снегомерных съёмок, однако notable расстояние между соседними профилями (около 300 м) не позволяет проинтерполировать результаты съёмки для получения подробных растров и использования

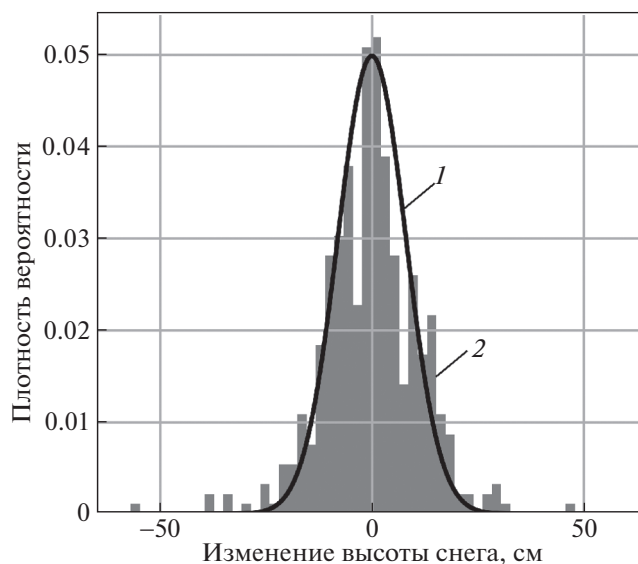


Рис. 3. Изменчивость высоты снежного покрова на масштабе в 10 м на леднике Альдегонда в 2021 г. (по георадарным данным): 1 – аппроксимация нормальным распределением, 2 – гистограмма реального распределения.

Fig. 3. Snow depth variation on the ten-meter distance at the Aldegondabreen in 2021 (radar measurements): 1 – approximation by the normal distribution; 2 – histogram of the in situ data.

их в качестве “истинных” распределений. Тем не менее, георадарная съёмка позволила косвенно учесть мелкомасштабную изменчивость высоты снега: проанализировав, насколько изменяется высота снега от одного измерения в профиле к следующему (т.е. в пределах десятиметрового расстояния), авторы получили гистограмму этой изменчивости (рис. 3). Видно, что изменения высоты снега при движении по профилю могут превышать 50 см по модулю; однако выявленная десятиметровая изменчивость может быть аппроксимирована нормальным распределением с $\mu = 0$ см и $\sigma = 8$ см. Именно это распределение и применяется в предложенном алгоритме при сдвиге точек моделируемых “снегомерных съёмок” по растру, размер ячеек которых сделан также равным десяти метрам. Таким образом, к сглаженным растрам применяется шум, моделирующий реальную мелкомасштабную изменчивость снежного покрова.

Эмпирические кривые погрешности. Распределение высоты снежного покрова по поверхности ледника Альдегонда в 2015–2021 гг., полученное на основе снегомерных съёмок и использованное для оценки случайной погрешности, показано на рис. 4. Основным результатом применения метода бутстреп к данным мониторинговых измерений на Шпицбергене является набор эмпирических кривых погрешностей снегомерной съёмки,

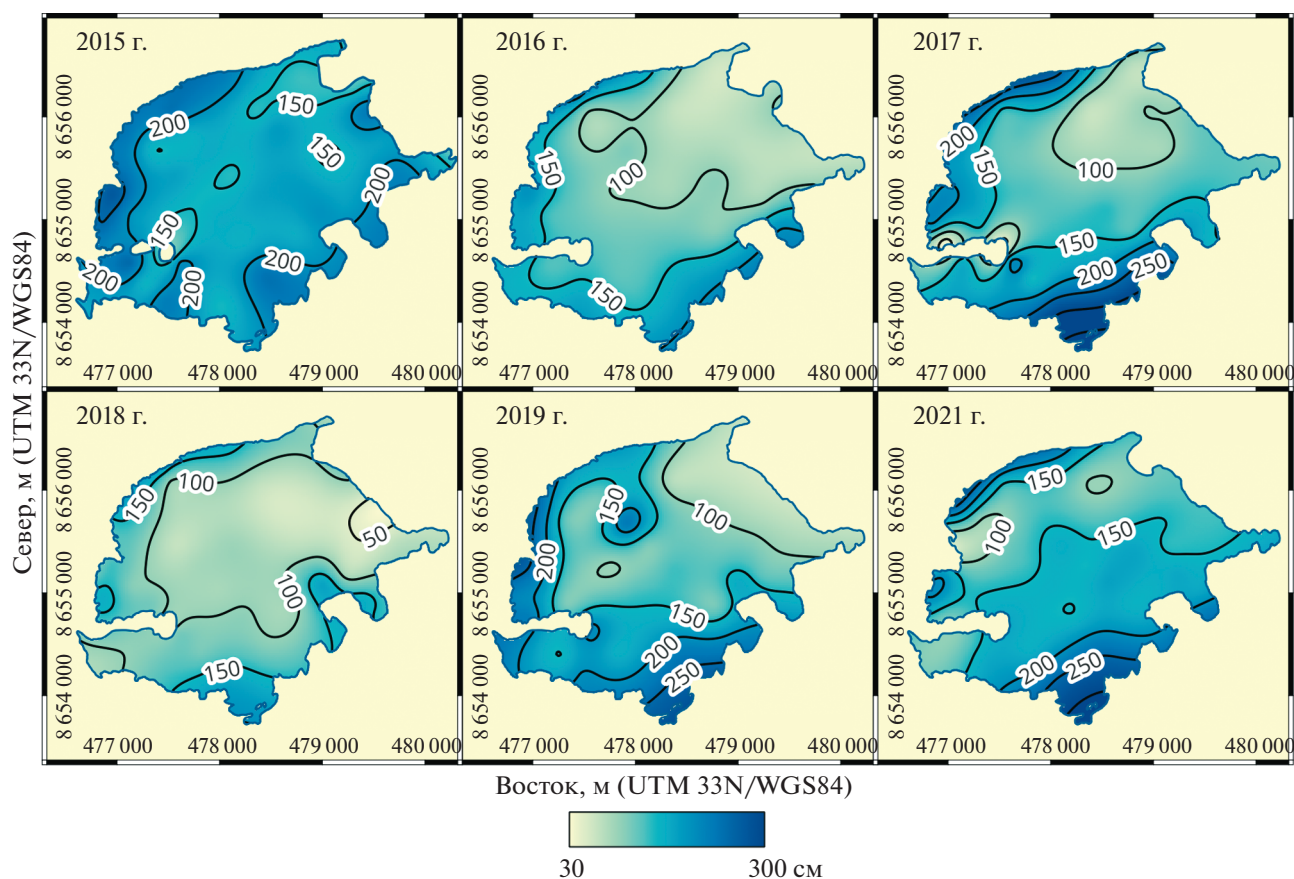


Рис. 4. Высота снежного покрова на леднике Альдегонда по данным снегомерных съёмок 2015–2021 гг.
Fig. 4. Snow depth distribution on Aldegondabreen obtained by the snow surveys of 2015–2021.

показанный на рис. 5. Видно, что обе исходные гипотезы исследования подтверждаются на практике.

Во-первых, погрешность определения средней высоты снега действительно проявляет зависимость от плотности сетки измерений. На рис. 5 видно, что количество измерений менее 2–3 точек на км² приводит к резкому росту неопределённости среднего значения. Следующий заметный перегиб кривых расположен в районе 7–8 точек на км², после чего погрешность уменьшается совсем незначительно. Из этого можно заключить, что оптимальное значение плотности промеров во время снегомерной съёмки лежит в районе 7–8 точек на км², а дальнейшее увеличение этого числа приводит лишь к росту трудоёмкости полевых работ, без существенного снижения итоговой погрешности.

Во-вторых, чем выше коэффициент вариации, опосредующий неоднородность снежного покрова, тем выше оказывается соответствующая кривая погрешности (см. рис. 5 и табл. 1). Отмечено, что такой результат может быть получен только при использовании *относительных* значений

ошибки. На графике можно заметить, что это правило работает не всегда: например, кривая 2018 г. оказывается выше кривой 2016 г., несмотря на чуть меньший коэффициент вариации ($C_v = 0.30$ против $C_v = 0.31$), что на первый взгляд противоречит исходной гипотезе. Однако значения коэффициентов вариации были рассчитаны на основе фактических измерений, то есть *выборочных*, и разумно предположить, что они также имеют некоторую погрешность. Поэтому *выборочный* коэффициент вариации может как несколько недооценивать, так и переоценивать реальную неоднородность снежного покрова в конкретный год, что и объясняет перестановку кривых местами. В контексте предлагаемого метода оценки погрешности реалистичная оценка неоднородности снежного покрова на основе имеющейся выборки может являться одним из препятствий для выбора подходящей эмпирической кривой, особенно при малом количестве измерений.

В том виде, в котором эмпирические кривые представлены на рис. 5, использовать их для решения практических задач сложно. Полезно не только изобразить кривые в графическом виде,

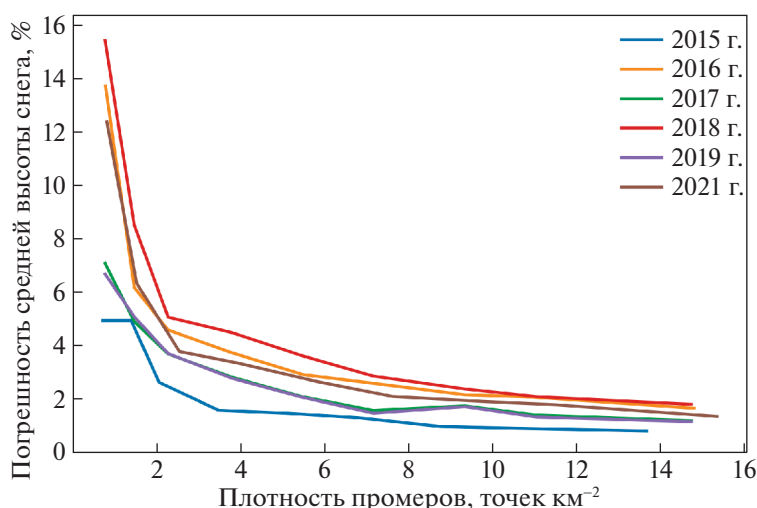


Рис. 5. Эмпирические кривые погрешностей определения средней высоты снежного покрова на леднике Альдегонда в зависимости от плотности сетки измерений.

Fig. 5. The empirical curves showing relationship between uncertainty of the mean snow depth on Aldegondabreen and measurement spatial density.

но и аппроксимировать их уравнением, которое позволит рассчитать погрешность средней высоты снега для любого произвольного количества точек измерений и любого коэффициента вариации. По форме полученных эмпирических кривых видно (см. рис. 5), что наилучшим образом для их аппроксимации годится дробно-линейная функция. В качестве такой функции авторами предлагается использовать следующее уравнение:

$$\frac{30 \times C_v}{x} + 5C_v,$$

где x — плотность промеров высоты снега в точках на км², значения коэффициентов подобраны методом наименьших квадратов по эмпирическим кривым (см. рис. 5), а итоговое значение погрешности будет выражено в процентах относительно средней величины. Пример сглаженных кривых погрешности, рассчитанных на основе уравнения, показан на рис. 6.

Источники погрешностей при снегомерных съёмках. Ранее для оценки точности определения средней высоты снежного покрова предлагалось несколько различных подходов, начиная от наиболее примитивных, когда за погрешность принимается среднее квадратическое отклонение в выборке (Belart et al., 2017). Проводились и более сложные эксперименты с полевыми работами, которые включали сравнение данных, полученных по разным маршрутам снегомерной съёмки, а также разными исполнителями на одном маршруте (Pulwiczki et al., 2018). Кроме того, в гляциологии применялся и сам метод бутстрэп, но для определения оптимального количества и расположения абляционных реек, устанавливаемых на

ледниках с целью измерений их таяния (Fountain, Vecchia, 1999; Galos et al., 2017).

Разные методы оценки погрешности высоты снежного покрова учитывают разные их источники. Наиболее очевидный источник ошибки — случайная погрешность единичного измерения высоты снега, возникающая в результате наклона или изгиба лавинного шупа. Поскольку при снегомерных работах измерения в одной и той же точке обычно проводятся в несколько приёмов, эта составляющая итоговой погрешности может быть довольно просто оценена на основе натуральных данных. Обзор показывает, что величина этой ошибки составляет не более 2–3 см (Zemp et al., 2013). Это гораздо меньше, чем погрешность, возникающая из-за неоднородного распределения снежного покрова по земной поверхности и зависящая от количества и расположения точек измерений. Так, по данным (Andreassen et al., 2016), эта погрешность может составлять 2–3 де-

Таблица 1. Основные параметры снежного покрова на леднике Альдегонда по данным снегомерных съёмок 2015–2021 гг.

Год	Средняя высота снега, см	Коэффициент вариации
2015	182	0.15
2016	120	0.31
2017	290	0.21
2018	105	0.30
2019	283	0.21
2021	161	0.27

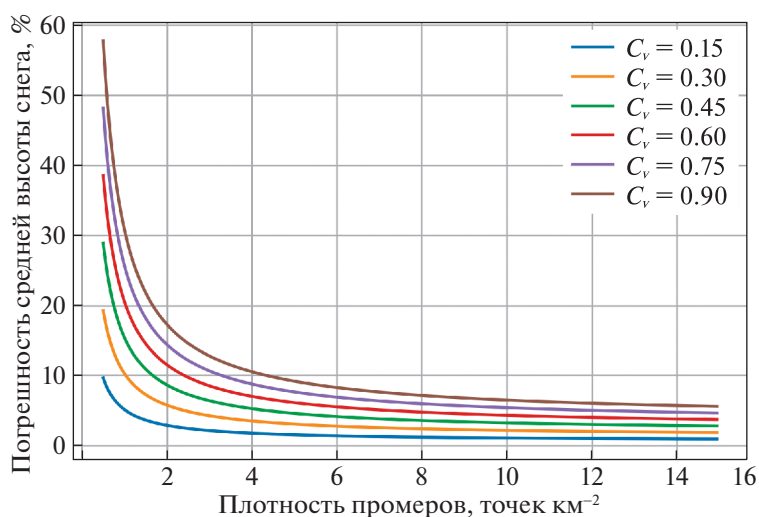


Рис. 6. Пример расчёта погрешностей определения средней высоты снежного покрова по предложенному эмпирическому уравнению.

Fig. 6. The example of uncertainties of the mean snow depth computed from the proposed equation.

циметра, что на порядок выше ошибки точечного измерения. Это подтверждается и результатами нашего исследования.

Отметим, что в данном исследовании никак не учитывается возможная *систематическая* составляющая погрешности. Источников подобных ошибок может быть несколько. Прежде всего, к ним можно отнести особенности распределения снега на поверхностях с большим уклоном, где провести натурные измерения зачастую сложно или вовсе невозможно из-за трудностей передвижения. Одновременно с этим из-за эффектов ветрового или лавинного перераспределения высота снега на этих частях водосборов может значительно отличаться от своей средней величины, оставаясь при этом непроверенной. Кроме того, при наличии ледяных корок внутри снежной толщи, они могут быть ошибочно приняты исполнителем за поверхность земли, систематически уменьшая измеренную высоту снежного покрова (Zemp et al., 2013). Шурфы позволяют изучить стратиграфию снежного покрова и уменьшить возможность возникновения подобных ошибок, но полностью их исключить, очевидно, нельзя. Невозможность учесть систематическую составляющую ошибки является принципиальным ограничением применяемого нами статистического метода, что необходимо учитывать при оценке итоговой погрешности на основе его результатов. Более того, несмотря на то, что плотность промеров на единицу площади, необходимая для расчётов погрешности по уравнению, может быть рассчитана при любом расположении точек измерений на водосборе, необходимо помнить, что эмпирические кривые были получены

для квазирегулярной сетки и вряд ли могут быть применимы для маршрутных съёмок.

Пример применения. В качестве примера практического применения результатов данного исследования, оценим погрешность средней высоты снежного покрова на леднике Западный Грэнфьорд, который расположен примерно в 5 км к югу от ледника Альдегонда, — здесь также выполняется масс-балансовый мониторинг. Ранее, в статье (Terekhov et al., 2021) для этой цели был использован наиболее примитивный подход, когда за погрешность принимается среднее квадратическое отклонение высоты снежного покрова по выборке. В табл. 2 приведено сравнение такого подхода с оценкой погрешности на основе эмпирического уравнения. Видно, что, с одной стороны, предыдущий использованный метод значительно переоценивает погрешность среднего значения высоты снега, а с другой, в год с наименьшим количеством измерений (2019/20 г.) он даёт значительно более низкую оценку, чем для остальных лет с большим количеством измерений, в то время как результаты, полученные на основе уравнения, более логичны, поскольку погрешность результата растёт с уменьшением количества точек.

Репрезентативность полученных результатов. Авторы полагают, что полученная методом бутстрэп эмпирическая формула может быть применима для любых ледников Шпицбергена. Основным доводом служит тот факт, что используемый в формуле коэффициент вариации снежного покрова косвенно отражает влияние на процесс снегонакопления как метеорологических факторов в конкретный год, так и особенностей рельефа на конкретном водосборе. Однако проверка

Таблица 2. Пример оценки погрешности средней высоты снежного покрова на основе предложенной эмпирической формулы для ледника Западный Грэнфьорд (Шпицберген) и выборки среднеквадратичного отклонения

Балансовый год	Количество измерений, точек (плотность промеров, число точек км ⁻²)	C_v	Средняя по леднику высота снега, см	Погрешность среднего, определённая как СКО выборки, см (%)	Погрешность среднего, определённая по уравнению (1), см (%)
2013/14	124 (7.6)	0.18	182	52 (29)	3 (2)
2014/15	89 (5.4)	0.28	181	50 (28)	5 (3)
2015/16	89 (5.4)	0.42	113	47 (42)	5 (4)
2016/17	88 (5.4)	0.29	160	46 (29)	5 (3)
2017/18	89 (5.4)	0.34	113	38 (34)	4 (4)
2018/19	58 (3.5)	0.52	138	72 (52)	10 (7)
2019/20	23 (1.4)	0.26	137	36 (26)	9 (7)

этого предположения требует дальнейших исследований.

Поскольку формула не позволяет оценить систематическую составляющую погрешности, её с осторожностью следует применять, например, на ледниках, расположенных выше снеговой линии, где может возникнуть ошибка в определении поверхности предыдущего лета. Кроме того, отметим, что формула была получена для *площадных* снегомерных съёмок, проводимых по квазирегулярной сетке, и не применима для маршрутных измерений.

ВЫВОДЫ

На основе статистического метода бутстрэп и данных натурных измерений в окрестностях населённого пункта Баренцбург (Шпицберген) авторами был получен набор эмпирических кривых, позволяющих оценить погрешность средней по леднику Альдегонда величины высоты снега. Показано, что случайная ошибка среднего значения будет зависеть от плотности измерений на единицу площади и от коэффициента вариации снежного покрова. Минимальное пороговое количество измерений, ниже которого неопределённость среднего показателя вырастает стремительно, составляет 2–3 точки на км², а при плотности сетки промеров более 7–8 точек на км² погрешность практически не снижается. С практической точки зрения это означает, что плотность сетки в 7–8 точек на 1 км² оптимальна при проведении снегомерных съёмок на ледниках в районе Баренцбурга.

Чтобы на основе полученных кривых было возможно рассчитывать погрешность для любого произвольного количества точек снегомерной съёмки и коэффициента вариации, они были аппроксимированы уравнением. Однако насколько хорошо полученные кривые описывают погреш-

ность высоты снежного покрова для других ледников, отличающихся от Альдегонды по размеру и морфологии, требует дальнейшей проверки. Принципиальные ограничения предложенного метода таковы: отсутствие учёта систематических ошибок, связанных с недостаточным опробованием тех частей водосбора, где возможно значительное отклонение высоты снега от средней величины; метод годится только для площадных съёмок, а при практическом его применении для малого количества измерений, проблемой может стать реалистичный расчёт коэффициента вариации.

Благодарности. Авторы выражают благодарность участникам Российской арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген (ААНИИ) за предоставленное оборудование, помощь в организации и проведении полевых работ.

Исследование выполнено в рамках темы 5.1.4 Плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг. “Мониторинг состояния и загрязнения природной среды, включая криосферу, в Арктическом бассейне и районах научно-исследовательского стационара “Ледовая база Мыс Баранова”, Гидрометеорологической обсерватории Тикси и Российского научного центра на архипелаге Шпицберген”.

Acknowledgements. The authors are grateful to the Russian Arctic Expedition on Svalbard (Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia) for providing logistics, equipment and for helping to carry out the field studies.

This study was funded under Project 5.1.4, “Monitoring of State and Pollution of the Environment, Including the Cryosphere, in the Arctic Basin and in the Area of Scientific Station Ice Base Cape Baranov, Hydrometeorological Observatory of Tiksi and Russian Scientific Centre on Spitsbergen”, within the Plan NITR of Roshydromet 2020–24.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисик А.Л., Новиков А.Л., Глазовский А.Ф., Лаврентьев И.И., Веркулич С.Р.* Структура и динамика ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) по данным повторных георадиолокационных исследований 1999, 2018 и 2019 годов // *Лёд и Снег*. 2021. Т. 61. № 1. С. 26–37.
- Василевич И.И., Чернов Р.А.* К оценке снегозапасов в русловых врезках методом георадиолокации на территории Арктического региона // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2018. Т. 64. № 1. С. 5–15.
- Лаврентьев И.И., Кутузов С.С., Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я., Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А., Черняков Г.А.* Толщина снежного покрова на леднике Восточный Гренфьорд (Шпицберген) по данным радарных измерений и стандартных снегомерных съёмок // *Лёд и Снег*. 2018. Т. 58. № 1. С. 5–20.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-1-5-20>
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. 1. Метеорологические наблюдения на станциях. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 301 с.
- РД 52.25.261–90. Руководство по снегомерным работам в горах. М.: Роскомгидромет СССР, 1991. 127 с.
- Ромашова К.В., Чернов Р.А., Василевич И.И.* Исследование ледникового стока рек в бассейне залива Гренфьорд (Западный Шпицберген) // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019. Т. 65. № 1. С. 34–45.
- Шутиков В.К., Розенберг Г.С.* Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R. Тольятти: Кассандра, 2013. 314 с.
- Andreassen L.M., Elvehøy H., Kjølmoen B., Engeset R.V.* Reanalysis of long-term series of glaciological and geodetic mass balance for 10 Norwegian glaciers // *The Cryosphere*. 2016. V. 10. № 2. P. 535–552.
<https://doi.org/10.5194/tc-10-535-2016>
- Belart J.M.C., Berthier E., Magnússon E., Anderson L.S., Pálsson F., Thorsteinsson T., Howat I.M., Aðalgeirsdóttir G., Jóhannesson T., Jarosch A.H.* Winter mass balance of Drangajökull ice cap (NW Iceland) derived from satellite sub-meter stereo images // *The Cryosphere*. 2017. V. 11. № 3. P. 1501–1517.
<https://doi.org/10.5194/tc-11-1501-2017>
- Brucker L., Markus T.* Arctic-scale assessment of satellite passive microwave-derived snow depth on sea ice using Operation IceBridge airborne data // *Journ. of Geophys. Research: Oceans*. 2013. V. 118. № 6. P. 2892–2905.
- Dai L., Che T., Zhang Y., Ren Z., Tan J., Akynbekkyzy M., Xiao L., Zhou S., Yan Y., Liu Y., Li H., Wang L.* Microwave radiometry experiment for snow in Altay, China: time series of in situ data for electromagnetic and physical features of snowpack // *Earth System Science Data*. 2022. V. 14. № 8. P. 3509–3530.
<https://doi.org/10.5194/essd-14-3509-2022>
- Efron B.* Bootstrap methods: another look at the jackknife // *The Annals of Statistics*. 1979. V. 7. № 1. P. 1–26.
- Fountain A.G., Vecchia A.* How many stakes are required to measure the mass balance of a glacier? // *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 1999. V. 81. № 4. P. 563–573.
<https://doi.org/10.1111/1468-0459.00084>
- Førland E.J., Hanssen-Bauer I.* Increased precipitation in the Norwegian Arctic: true or false? // *Climatic Change*. 2000. V. 46. № 4. P. 485–509.
<https://doi.org/10.1023/A:1005613304674>
- Galos S.P., Klug C., Maussion F., Covi F., Nicholson L., Rieg L., Gurgiser W., Mölg T., Kaser G.* Reanalysis of a 10-year record (2004–2013) of seasonal mass balances at Langenferner/Vedretta Lunga, Ortler Alps, Italy // *The Cryosphere*. 2017. V. 11. № 3. P. 1417–1439.
<https://doi.org/10.5194/tc-11-1417-2017>
- Hagen J.O., Liestøl O.* Long-term glacier mass-balance investigations in Svalbard, 1950–88 // *Annals of Glaciology*. 1990. V. 14. P. 102–106.
<https://doi.org/10.3189/S0260305500008351>
- Hanssen-Bauer I., Førland E.J., Hisdal H., Mayer S., Sandø A.B., Sorteberg A.* Climate in Svalbard 2100 – a knowledge base for climate adaptation. NCSS report M-1242. Norwegian Environment Agency (Miljødirektoratet). 2019. 208 p.
- Isaksen K., Nordli Ø., Ivanov B., Koltzow M.A.Ø., Aaboe S., Gjeltén H.M., Mezghani A., Eastwood S., Førland E., Benestad R.E., et al.* Exceptional warming over the Barents area // *Scientific reports*. 2022. V. 12. № 1. P. 1–18.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-13568-5>
- Kelly R.* The AMSR-E snow depth algorithm: Description and initial results // *Journ. of the Remote Sensing Society of Japan*. 2009. V. 29. № 1. P. 307–317.
- Nowak A., Hodgkins R., Nikulina A., Osuch M., Wawrzyniak T., Kavan J., Łepkowska E., Majerska M., Romashova K., Vasilevich I., Sobota I., Rachlewicz G.* From land to fjords: The review of Svalbard hydrology from 1970 to 2019 // *The State of Environmental Science in Svalbard*. 2021. P. 177–201.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.4294063>
- Pulwiczki A., Flowers G., Radić V., Bingham D.* Estimating winter balance and its uncertainty from direct measurements of snow depth and density on alpine glaciers // *Journ. of Glaciology*. 2018. V. 64. № 247. P. 781–795.
<https://doi.org/10.1017/jog.2018.68>
- Terekhov A.V., Verkulich S.R., Borisik A.L., Demidov V.E., Prokhorova U.V., Romashova K.V., Anisimov M.A., Sidorova O.R., Tarasov G.* Mass balance, ice volume, and flow velocity of the Vestre Grøn fjordbreen (Svalbard) from 2013/14 to 2019/20 // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2022. V. 54. № 1. P. 584–602.
<https://doi.org/10.1080/15230430.2022.2150122>
- Urazgildeeva A.V., Sviashchennikov P.N., Ivanov B.V., Isaksen K., Førland E.J., Brkkan R.* Comparative analysis of Russian and Norwegian precipitation gauges, measurements in Barentsburg, Western Spitsbergen // *Czech Polar Reports*. 2017. V. 7. № 1. P. 45–51.
- Zemp M., Thibert E., Huss M., Stumm D., Rolstad Denby C., Nuth C., Nussbaumer S.U., Moholdt G., Mercer A., Mayer C., Joerg P.C., Jansson P., Hynek B., Fischer A., Escher-Vetter H., Elvehøy H., Andreassen L.M.* Reanalysing glacier mass balance measurement series // *The Cryosphere*. 2013. V. 7. № 4. P. 1227–1245.
<https://doi.org/10.5194/tc-7-1227-2013>

Citation: Terekhov A.V., Vasilevich I.I., Prokhorova U.V. Uncertainty assessment for mean snow cover depth derived from direct measurements on Aldegondabreen glacier (Svalbard). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (3). 357–368 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423030122

Uncertainty Assessment for Mean Snow Cover Depth Derived from Direct Measurements on Aldegondabreen Glacier (Svalbard)

A. V. Terekhov^{a,#}, I. I. Vasilevich^a, and U.V. Prokhorova^a

^a Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

[#]e-mail: antonvterekhov@gmail.com

Received March 27, 2022; revised May 5, 2023; accepted June 27, 2023

This study introduces an empirical equation allowing to estimate an uncertainty of area-averaged snow depth on the Aldegondabreen Glacier, computed from standard snow surveys and made by an avalanche probe or by similar equipment. The two-decade history of the ongoing mass-balance monitoring program on this glacier shows that the methodology of field work on snow-measuring survey varies somewhat from year to year: the number and location of measurement points change. To identify and quantify long-term trends and variations in snow cover, it is crucial to assess the inter-comparability of the data in the obtained measurement series. The proposed equation was intended to solve this task basing on the collected data only, allowing to estimate the uncertainty even retrospectively. To build this equation, we applied a bootstrap statistical approach to the results of snow surveys carried out in Svalbard in 2015–2021. After interpolating the field measurements, obtained rasters were sampled sequentially with different numbers of points, simulating the real snow survey. The points were initially located in a form of a quasiregular grid and then randomly shifted between the iterations. After a thousand simulations for each number of points, the standard deviations were calculated relative to the “true” values, derived from corresponding rasters. These standard deviations, which we admit to be a random error of the area-averaged snow depth value, expectedly decrease with the number of sampling points and increase with the coefficient of variation (C_v). The well-known C_v index indirectly characterizes the irregularity of snow cover. After approximating the bootstrap results, the authors derived an equation that yields a relative error. The equation includes only two predictors which are the probing density per area unit and the C_v , which potentially allows using it for the other glaciers. However, the universality of the empirically obtained coefficients is debatable, since they may vary due to a glacier size, its morphology and other parameters.

Keywords: snow survey, uncertainty estimation, bootstrap, snow depth, Svalbard, Arctic

REFERENCES

- Borisik A.L., Novikov A.L., Glazovsky A.F., Lavrentiev I.I., Verkulich S.R. Structure and dynamics of Aldegondabreen, Spitsbergen, according to repeated GPR surveys in 1999, 2018 and 2019. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021, 61 (1): 26–37 [In Russian].
- Vasilevich I.I., Chernov A.A. Estimation of Snow Reserves in Watercourses in the Arctic Region. *Problemi Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research*. 2018, 64 (1): 5–15 [In Russian].
- Lavrentiev I.I., Kutuzov S.S., Glazovsky A.F., Macheret Y.Y., Osokin N.I., Sosnovsky A.V., Chernov R.A., Chernikov G.A. Snow thickness on Austre Grønfyordbreen, Svalbard, from radar measurements and standard snow surveys. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018, 58 (1): 5–20 [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-1-5-20>
- Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam. Guidelines for hydrometeorological stations and gauges. V. 3. Pt. 1. Weather observations at the stations. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1985: 301 p. [In Russian].
- RD 52.25.261-90 *Rukovodstvo po snegomernim rabotam v gorakh*. Manual for snow surveys in the mountains. Moscow: Roskomgidromet SSSR, 1991: 127 p. [In Russian].
- Romashova K.V., Chernov R.A., Vasilevich I.I. Study of the glacial flow of rivers in the Grønfyord bay basin (Western Svalbard). *Problemi Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research*. 2019, 65 (1): 34–45 [In Russian].
- Shitikov V.K., Rosenberg G.S. *Randomizatsiya i butstrep: statisticheskiy analiz v biologii i ekologii s ispol'zovaniem R*. Randomization and bootstrap: statistical analysis in biology and ecology using the R. Tolyatti: Cassandra, 2013: 314 p. [In Russian].
- Andreassen L.M., Elvehøy H., Kjølmoen B., Engeset R.V. Reanalysis of long-term series of glaciological and geodetic mass balance for 10 Norwegian glaciers. *The Cryosphere*. 2016, 10 (2): 535–552. <https://doi.org/10.5194/tc-10-535-2016>

- Belart J.M.C., Berthier E., Magnússon E., Anderson L.S., Pálsson F., Thorsteinsson T., Howat I.M., Aðalgeirsdóttir G., Jóhannesson T., Jarosch A.H.* Winter mass balance of Drangajökull ice cap (NW Iceland) derived from satellite sub-meter stereo images. *The Cryosphere*. 2017, 11 (3): 1501–1517.
<https://doi.org/10.5194/tc-11-1501-2017>
- Brucker L., Markus T.* Arctic-scale assessment of satellite passive microwave-derived snow depth on sea ice using Operation IceBridge airborne data. *Journ. of Geophysical Research: Oceans*. 2013, 118 (6): 2892–2905.
- Dai L., Che T., Zhang Y., Ren Z., Tan J., Akynbekkyzy M., Xiao L., Zhou S., Yan Y., Liu Y., Li H., Wang L.* Microwave radiometry experiment for snow in Altay, China: time series of in situ data for electromagnetic and physical features of snowpack. *Earth System Science Data*. 2022, 14 (8): 3509–3530.
<https://doi.org/10.5194/essd-14-3509-2022>
- Efron B.* Bootstrap methods: another look at the jackknife. *The Annals of Statistics*. 1979, 7 (1): 1–26.
- Fountain A.G., Vecchia A.* How many stakes are required to measure the mass balance of a glacier? *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 1999, 81 (4): 563–573.
<https://doi.org/10.1111/1468-0459.00084>
- Førland E.J., Hanssen-Bauer I.* Increased precipitation in the Norwegian Arctic: true or false? *Climatic change*. 2000, 46 (4): 485–509.
<https://doi.org/10.1023/A:1005613304674>
- Galos S.P., Klug C., Maussion F., Covi F., Nicholson L., Rieg L., Gurgiser W., Mölg T., Kaser G.* Reanalysis of a 10-year record (2004–2013) of seasonal mass balances at Langenferner/Vedretta Lunga, Ortler Alps, Italy. *The Cryosphere*. 2017, 11 (3): 1417–1439.
<https://doi.org/10.5194/tc-11-1417-2017>
- Hagen J.O., Liestøl O.* Long-term glacier mass-balance investigations in Svalbard, 1950–88. *Annals of Glaciology*. 1990, 14: 102–106.
<https://doi.org/10.3189/S0260305500008351>
- Hanssen-Bauer I., Førland E.J., Hisdal H., Mayer S., Sandø A.B., Sorteberg A.* Climate in Svalbard 2100 – a knowledge base for climate adaptation. NCSS report M-1242. Norwegian Environment Agency (Miljødirektoratet). 2019: 208 p.
- Isaksen K., Nordli Ø., Ivanov B., Koltzow M.A.Ø., Aaboe S., Gjelten H.M., Mezghani A., Eastwood S., Førland E., Benestad R.E., et al.* Exceptional warming over the Barents area. *Scientific reports*. 2022, 12 (1): 1–18.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-13568-5>
- Kelly R.* The AMSR-E snow depth algorithm: Description and initial results. *Journ. of the Remote Sensing Society of Japan*. 2009, 29 (1): 307–317.
- Nowak A., Hodgkins R., Nikulina A., Osuch M., Wawrzyniak T., Kavan J., Łepkowska E., Majerska M., Romashova K., Vasilevich I., Sobota I., Rachlewicz G.* From land to fjords: The review of Svalbard hydrology from 1970 to 2019. *The State of Environmental Science in Svalbard*. 2021: 177–201.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.4294063>
- Pulwiczki A., Flowers G., Radić V., Bingham D.* Estimating winter balance and its uncertainty from direct measurements of snow depth and density on alpine glaciers. *Journ. of Glaciology*. 2018, 64 (247): 781–795.
<https://doi.org/10.1017/jog.2018.68>
- Terekhov A.V., Verkulich S.R., Borisik A.L., Demidov V.E., Prokhorova U.V., Romashova K.V., Anisimov M.A., Sidorova O.R., Tarasov G.* Mass balance, ice volume, and flow velocity of the Vestre Grønfjordbreen (Svalbard) from 2013/14 to 2019/20. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2022, 54 (1): 584–602.
<https://doi.org/10.1080/15230430.2022.2150122>
- Urazgildeeva A.V., Sviashchennikov P.N., Ivanov B.V., Isaksen K., Førland E.J., Brkkan R.* Comparative analysis of Russian and Norwegian precipitation gauges, measurements in Barentsburg, Western Spitsbergen. *Czech Polar Reports*. 2017, 7 (1): 45–51.
- Zemp M., Thibert E., Huss M., Stumm D., Rolstad Denby C., Nuth C., Nussbaumer S.U., Moholdt G., Mercer A., Mayer C., Joerg P.C., Jansson P., Hynek B., Fischer A., Escher-Vetter H., Elvehøy H., Andreassen L.M.* Reanalyzing glacier mass balance measurement series. *The Cryosphere*. 2013, 7 (4): 1227–1245.
<https://doi.org/10.5194/tc-7-1227-2013>