Научная статья / Scientific paper
УДК: 551.577.21
DOI: 10.34753/HS.2025.7.1.62

История изучения метелевого переноса снега: международные аспекты и вызовы

М.С. Сергеев
Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН;
Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия
e-mail: sergeevsnow@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена истории изучения метелевого переноса снега, его значимости и междисциплинарным аспектам исследования. Для составления по возможности полной картины международной истории изучения метелевого переноса снега было изучено разными методами около 3000 работ на нескольких языках по темам связанным с метелевым снегопереносом. Была собрана информация по текущему состоянию развития направления, были сделаны выводы по актуальным проблемам и возможным путям их решения. Также были проанализированы варианты употребления основных терминов на русском и английском языках, найдены несоответствия в понимании некоторых терминов и предложен вариант стандартизации определений для единообразного применения терминов в международном общении.

Ключевые слова: метелевый перенос снега; снегоперенос; турбулентный поток; терминология; история.
Для цитирования: Сергеев М.С. История изучения метелевого переноса снега: международные аспекты и вызовы // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 1. С. 62–88. DOI: 10.34753/HS.2025.7.1.62.

The history of blowing snow transport research: international aspects and challenges

Mikhail S. Sergeev
The Institute of marine Geology and Geophysics of the far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences; Special Research Bureau for Automation of Marine Researches of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
e-mail: sergeevsnow@mail.ru

Abstract. This article addresses the history of research on blowing snow transport, its significance, and the interdisciplinary dimensions of this field. To provide a comprehensive account of the international history of blowing snow transport studies, approximately 3,000 publications in multiple languages related to blowing snow transport were reviewed using various methodological approaches. The current state of research in this area was assessed, and conclusions were drawn regarding prevailing challenges and potential avenues for their resolution. Furthermore, the study analyzed the usage of principal terms in both Russian and English, identified discrepancies in the interpretation of certain terms, and proposed a standardized set of definitions to promote consistency in terminology for international scientific communication.

Key words: snowdrift transport; snow transport; turbulent flow; terminology; history.
For citation: Sergeev M.S. The history of blowing snow transport research: international aspects and challenges. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 1, pp. 62–88. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS. 2025.7.1.62.

Введение

Метелевый перенос снега – сложное явление, которое играет существенную роль во многих процессах, связанных с глобальным климатом, гидрологией, лавинной безопасностью, безопасностью на транспорте и крупных инфраструктурных строениях. Сложность этого явления заключается в его временной и пространственной изменчивости, взаимовлиянии с процессами, протекающими в атмосфере и на земной поверхности, огромными масштабами территорий и в большом разнообразии ландшафтов, где оно встречается. Турбулентная природа процесса

переноса снега делает его особенно сложным для изучения, т.к. любое изменение в параметрах поверхности или свойствах атмосферы может существенно влиять на характер снегопереноса, а его вертикальная и горизонтальная изменчивость до сих пор является проблемой для точного определения параметров ветрового переноса снега.

На протяжении истории изучения метелевого переноса снега, которая насчитывает около 150 лет, в понимании этого процесса были заинтересованы представители различных наук, что является причиной сложности в систематизации знаний и построения общемирового терминологического аппарата.

Данное явление рассматривается в основном как часть общей метели или как явление с незначительным, в частности для дорожных служб, эффектом [1]. Однако с многократно возросшим в последнее десятилетие количеством транспортных средств и бурным развитием арктических территорий, особенно в условиях повышения спроса на внутренний туризм проблема снегопереноса становится более существенной. Моментальное изменение параметров видимости и создания снежных заторов на пути следования транспорта через открытые участки местности несёт прямую угрозу жизни участникам дорожного движения.

Целью написания данной статьи является установление тенденций развития, выявление текущих проблем и определение возможных путей решения в направлении изучения метелевого переноса снега путём анализа имеющихся исторических данных в русскоязычном и англоязычных научных сегментах литературы, посвященной явлению метелевого снегопереноса.

Методы и материалы исследований

Для написания статьи были использованы учебники, научные и научно-популярные статьи, опубликованные преимущественно на двух языках – русском и английском. Часть изученных документов были на немецком, японском и норвежском языках. Примерный перевод производился с использованием нейросетевых интерфейсов, которые не способны точно переводить научные статьи, но способны обобщать и выделять основную суть написанного. Статьи на английском языке автор способен переводить самостоятельно, поэтому нейросетевой перевод использовался только в качестве дополнительного инструмента.

Для выявления трендов в изменении направления интересов в исследованиях по изучению особенностей метелевого переноса снега был использован следующий метод: из около 200 различных статей были скопированы списки литературы и объединены в одном файле, по которому проводился анализ трендов в использовании ключевых слов. В результате объединения в файле находилось более 3000 строк содержащих информацию в следующем формате (1 колонка – фамилия авторов, 2 колонка – год написания книги или научной публикации, 3 – название публикации на языке оригинала, 4 – перевод названия публикации на русский язык).

В процессе обработки повторяющиеся названия статей объединялись, затем строчке с названием статьи присваивался номер, соответствующий количеству повторений в первоначальном списке. В результате был сформирован список, содержащий 2700 наименований статей и других опубликованных материалов, которые напрямую имели отношение к вопросам изучения метелевого переноса снега за период с 1871 по 2025 гг. Статьи, на которые чаще всего ссылались в работах, автор изучал в первую очередь. Также сформированный список публикаций позволял определять, в какой исторический период авторами наиболее активно начинала использоваться комбинация слов в своих работах, что указывало на то, какое именно направление или метод в данный момент считался наиболее интересным для исследования. Подобным образом были установлены фамилии авторов и названия публикаций с большим числом цитирований (таблица 1).

Терминология и основные понятия

Согласно определению Дюнина А. К. «метелевый перенос снега (снегоперенос) – процесс, при котором при достижении ветра в приземном слое определённой поступательной скорости, находящийся на поверхности земли и падающий на неё из атмосферы снег, приходит в

движение, подхватываемый ветром» [1]. Преимущественно изучением явления снегопереноса занимается родившаяся в 1960-х гг. наука снеговедение. Снеговедение – наука о снеге и снежном покрове, которая является разделом гляциологии, на ряду с лавиноведением, ледниковедением, ледоведением водоёмов и водотоков, палеогляциологией [2]. На постсоветском научном пространстве применяется термин «снеговедение», в то время как аналогом этого понятия в западном научном сообществе можно считать термин *snow science* (наука о снеге). Однако стоит отметить, что в англоязычных гляциологических словарях автором не обнаружено определение этого понятия, в то время как в англоязычных научно-популярных статьях оно иногда встречается.

Метелью называют явление переноса снега ветром над поверхностью земли [2]. В снеговедении выделяют следующие типы метелей: *верховая* – снегопад при ветре до приземления атмосферных снежинок; *низовая* – перемещение ветром вдоль земной поверхности и только что упавших, и ранее отложенных снежных частиц; *общая* – сочетание верховой и низовой метелей [3]. Однако в метеорологии вовсе не выделяют такое понятие как «верховая метель» [4].

Перемещение ветром вдоль земной поверхности и только что упавших, и ранее отложенных снежных частиц называется по-разному в зависимости от высоты подъёма снега над поверхностью. Так, в «Словаре терминов по снеговедению» [3] процесс, при котором снежные частицы переносятся выше глаз наблюдателя, но видно безоблачное небо и отсутствует снегопад называют *низовой метелью*, а *позёмком* – перенос снежных частиц на высоте до уровня глаз наблюдателя, в то же время в «Гляциологическом словаре» Котлякова (1984) указано, что «…различают позёмок, при котором снег, переносится до высоты 10–20 см», в нормативных документах Росгидромета поземок определяют как перенос снега вдоль поверхности снежного покрова (высота поднятия не более 1,5 м). [5]. Таким образом, можно сделать вывод, что до сих пор в России не сложился единый устоявшийся научный терминологический аппарат в отраслях наук, так или иначе занимающихся исследованием метелевого снегопереноса.

В англоязычной литературе для описания метелевого переноса снега используют термин *drifting snow* и *blowing snow,* однако, как будет разобрано далее, сложно однозначно провести прямую параллель между русскими терминами и английскими. По некоторым источникам можно поставить знак равенства между *позёмком* и *drifting snow*, а по некоторым нет. Такой же вопрос и с *низовой метелью* и *blowing snow. Blowing snow* – термин, который часто используют в англоязычной научной речи в общем смысле, аналог *снегопереноса,* т.е. весь снег, переносимый ветром [6–7], а иногда в специальном – чаще всего имея ввиду именно снег, поднятый ветром с поверхности земли выше условной отметки равной 1,8–2,0 метра [7–8].

Важно отметить, что метель – это только один из видов дефляции или выдувания ветром верхних слоёв земной поверхности. Так как на планете Земля множество мест, где снега нет, но есть песок и незащищённая почва, то помимо снега ветровой поток может подхватывать частички песка, вызвав, например, песчаную бурю, или «чёрную бурю», если будут подхвачены частички почвы.

Из-за механической схожести этих процессов учёные изучающие другие виды дефляции оказали сильное влияние на развитие снеговедения. Более того, песок часто используется для замены снега в натурных экспериментах на протяжении всей истории развития наук о снеге.

Снежная метель – это турбулентный двухфазный поток, состоящий из твёрдой фазы (снег и другие примеси) и воздушной среды (*ветровой поток*). Поверхность снега, переносимые ветром частицы и параметры приповерхностного атмосферного слоя находятся в состоянии постоянного взаимовлияния [8].

Выделяют условно три фазы перемещения снега: *дефляция* / *erosion – перенос снега* / *snow transport – аккумуляция* / *deposition*. Каждая из этих фаз в отдельности или при их комбинации интересует представителей различных направлений науки: для сельского хозяйства важно предотвратить дефляцию снега и

плодородных слоёв почвы и накопить необходимое количество снега на полях для сохранения озимых или достаточного насыщения почвы влагой; для защиты транспортных магистралей необходимо понимать сколько снега переносится в среднем за год/десятилетие, чтобы правильно рассчитать расположение магистрали и спланировать необходимые защитные мероприятия; в гидрологии важно понимать сколько на той или иной территории будет снега и, соответственно, сколько снега сублимируется и сколько воды попадет в реки; в гляциологии важно понимать сколько снега накопится и сохранится на различных участках сброса и накопления массы для расчёта важнейшего параметра – баланса масс ледника.

Перемещение метелевых частиц может происходить тремя способами (рисунок 1а): *скольжение / волочение / creep* – форма движения частиц, когда они катятся или скользят по дефлируемой поверхности; *сальтация / saltation* – скачкообразное движение частиц (рисунки 1б,в); *взвесь / суспензия / suspension* – протяжённое во времени парение частиц в потоке без опускания на поверхность земли. В зависимости от параметров снежного покрова, скорости ветра, рельефа и характера постилающей поверхности доля снега, переносимого тем или иным способом, меняется. Вертикальная граница распространения сальтации чаще всего устанавливается на высоте 0,2 м над поверхностью [1]. В свою очередь для сальтирующей частицы существует два вида начала движения: в первом случае частица подхватывается непосредственно ветровым потоком и поднимается над поверхностью, а во втором – частица получает достаточный импульс для начала движения в результате удара в неё другой частицы. Для слоя волочения верхняя граница большинством авторов была определена на высоте до 0,01 м над поверхностью. Третьим способом является перемещение частиц в виде взвеси, верхняя граница которой может достигать по разным данным 100–300 метров [9], а по последним данным со спутников – и до 1000 метров [10].

Во многих работах в качестве ключевого фактора определена скорость ветра. Для метеорологии обычной практикой является измерение ветра на высотах 11–12 метров, однако известно, что ветер по мере приближения к поверхности изменяет свою скорость. Принято разными авторами [1, 6], что скорость ветра уменьшается примерно в 1,6–1,7 раза у поверхности (на высоте до 0,1 м) по сравнению с высотой флюгера. Так как это сильно усреднённое значение, для более точных расчётов используются различные формулы [1, 6, 11], которые в свою очередь могут дать более точное значение скорости ветра на определённой высоте в основном для стационарных условий равнинных областей.

Если рассматривать нестационарные условия, то важно упомянуть и о том, что профиль ветра изменяется нелинейно, что связано не только с увеличением концентрации снежных частиц в воздухе, но и с повышением влажности воздуха за счет активизации процесса сублимации переносимого снега в результате увеличения скорости ветра. Таким образом, описанные явления, происходящие в снеговетровом потоке, требуют более сложных измерений и расчётов. Нужно учитывать и турбулентную структуру пограничного слоя, которая создаёт сложные трёхмерные паттерны переноса снега с выраженными струями, поэтому необходимо учитывать и горизонтальную изменчивость параметров снегопереноса [7].

По причине влияния на снегоперенос такого большого количества факторов в реальности не существует абсолютной зависимости между скоростью ветра и наличием переноса снега. Возможны варианты, когда при очень высокой скорости ветра параметры поверхности не позволяют перемещаться снежным частицам. По этой причине важной задачей является установление *пороговой скорости начала переноса снега / threshold velocity* для конкретных физико-географических условий территории. Считается, что при только что выпавшем снеге и отрицательной температуре воздуха в приповерхностном слое снегоперенос начинается со скорости 2,7 м/с у поверхности (0,1 м) или около 5 м/с на высоте флюгера. Также установлено, что при положительной температуре воздуха снегоперенос не происходит [1].

В идеальных условиях, когда физико-географические параметры территории одинаковы, количество снега, переносимого метелью, в основном зависит от высоты над поверхностью и силы ветра – чем выше скорость ветра, тем больше переносится снега при одинаковых параметрах снежного покрова и параметрах приповерхностного слоя.

Зависимость объема снегопереноса от скорости ветра и высоты следующая: увеличение скорости ветра приводит к уменьшению доли переносимого у самой поверхности снега. Так, при скорости ветра 10 м/с на высоте флюгера в интервале от 0 до 1 метра над поверхностью переносится 77 % всего поднятого с поверхности снега, а при скорости ветра 35 м/с в этом же интервале – 36 % [6].

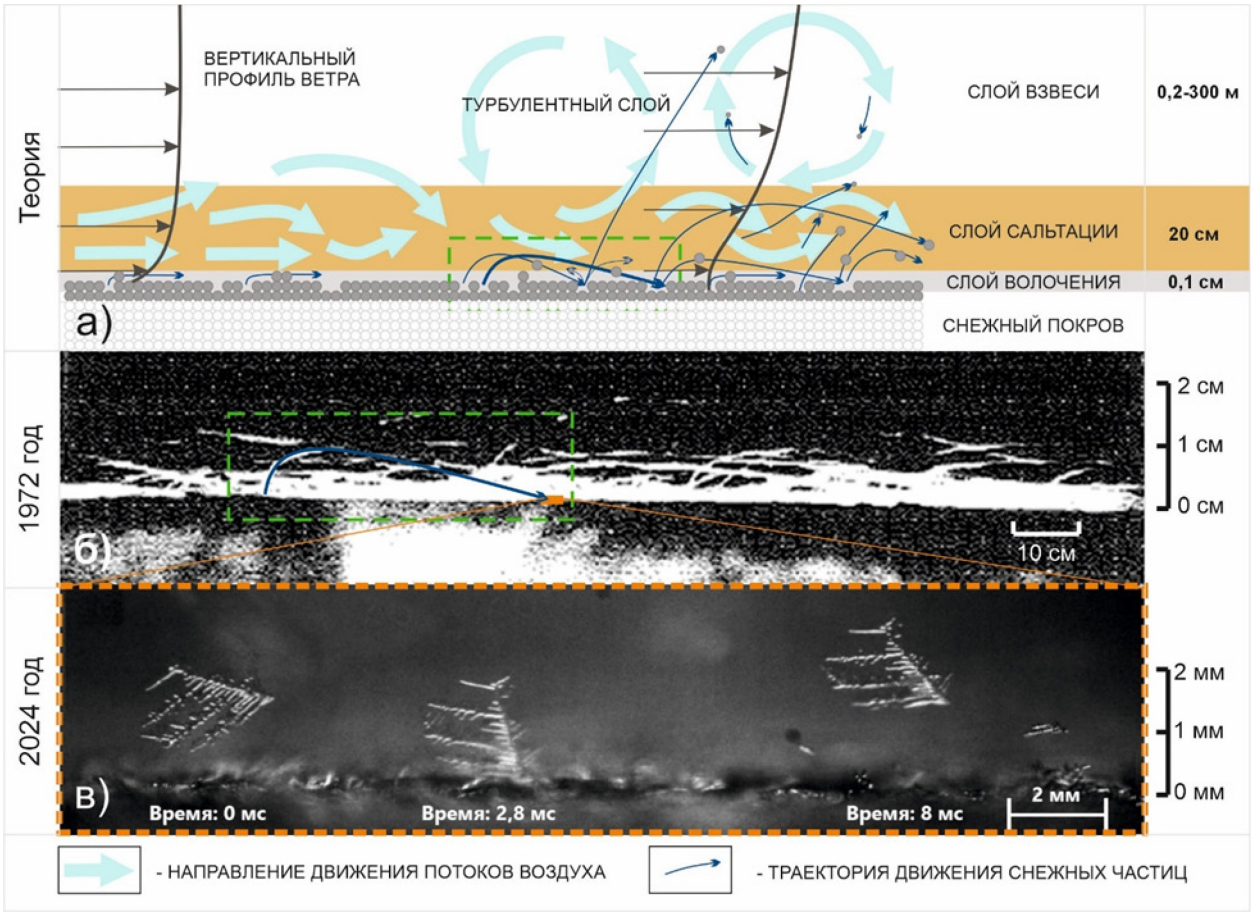


Рисунок 1. Теоретическая схема процесса снегопереноса (а); фотографии разных исторических периодов, подтверждающие обоснованность представленной схемы: фотография слоя сальтации [12] (б); фотография раскалывания снежной частицы на два фрагмента в результате ударения о поверхность в процессе сальтации [13] (в)

Figure 1. Theoretical scheme of the snow transport process: (a) and photographs from different historical periods confirming the validity of the presented scheme: (b) photograph of the saltation layer [12], (c) photograph of a snow particle splitting into two fragments as a result of impact on the surface during the saltation process [13]

Одним из основных параметров, вызывающих наибольший интерес у исследователей метелевого переноса снега, является количество снега, перенесённого снеговетровым потоком за определённое время через единицу длины фронта ветрового потока за промежуток времени. Этот параметр называется по-разному в зависимости от автора, сферы применения или страны: *общий твёрдый расход метели* (Q) / *интенсивность снегопереноса* (I) / *total transport rate* (q). Для его расчёта в различных странах с 1950-х гг. были разработаны десятки различных полуэмпирических формул [1, 6, 9]. Большинство этих формул объединяет

степенная зависимость количества перенесённого снега от скорости ветра. Степень, в которую возводят скорость ветра варьируется чаще всего от 2 до 4 и более. Не все авторы согласны со степенной зависимостью, поэтому выделяют также и логарифмическую [9]. В основном благодаря своей простоте и лёгкости расчётов в России на практике применяется формула Мельника Д.М.: $I=CV^3$, где C – безразмерный эмпирический коэффициент, который, например, для Сахалина составляет 0,01004, а для европейской части страны – 0,0129, тогда размерность I – г/(см·мин).

При метелевом переносе снежинки способны сублимироваться – вода в снежинке переходит из твёрдой фазы в газообразную минуя жидкую фазу. Таким образом, в полёте снежинка теряет свою массу быстрее, чем в спокойном состоянии. Этому ещё способствует и раскалывание частичек снега в процессе соударения во время сальтации (рисунок 1в). По мнению разных исследователей при некоторых обстоятельствах этот процесс может быть ответственен за исчезновение более половины объёма выпавшего и перенесённого снега [14]. Общая схема процесса *сублимации* / *возгонки* / *sublimation* выглядит следующим образом: порыв ветра сдувает снежные частицы с поверхности и находясь в воздухе частицы начинают быстрее сублимироваться, так как вся поверхность частицы контактирует с атмосферой, а не часть, как при нахождении в спокойном состоянии на поверхности снежного покрова. Именно процесс сублимации отвечает за конечное расстояние, которое может преодолеть снежная частица, участвующая в переносе снега метелью, в отличии от ветрового переноса песка или частичек почвы [1].

Следующее важное свойство метелевого потока – свойство *насыщения метели снегом*. Снеговетровому потоку необходимо пройти некоторое расстояние, чтобы поднять с поверхности максимально возможное количество снега. Такое расстоянии называется *длиной разгона метели* / *wind fetch*, а метель, которая переносит максимум снега – *насыщенной метелью* / *saturated flow*. Насыщенная метель постоянно осаждает часть переносимого материала и опять его набирает. Существуют две теории: теория лимитов и диффузионная теория – первая утверждает, что существует предельное количество снега, которое метель способна перенести для данной скорости ветра, а вторая говорит о том, что для основной массы снега перемещающегося в слое взвеси нет ограничений [15]. По мнению [16], достижение состояния насыщенной метели вообще невозможно для условий снегопереноса в горах.

Кроме параметров атмосферы и свойств снежного покрова на объёмы снегопереноса сильнейшим образом влияет ландшафт территории. По этой причине ещё в 1974 г. Котляков В.М. высказал идею о необходимости создания отдельного научного направления – ландшафтного снеговедения. Особенности снегопереноса изучались в мире учёными из разных стран и целью их научного интереса были различные участки нашей планеты. На территории Советского союза объектом исследования являлись в основном равнинные пространства Сибири, которые изучались с целью обеспечения транспортной безопасности. В западных странах объектом чаще всего выступали покровные ледники Гренландии, где изучалась динамика их таяния/накопления в зависимости от объемов перенесённого снега, а также устанавливалась степень влияния ледников на климат территории.

В результате изучения метелевого переноса снега в Европе и СССР были выявлены особенности, отличающие характер снегопереноса и степень его влияния на окружающее пространство в зависимости от ландшафта. Для равнинных территорий было установлено, что наибольший вклад в перенос снега вносит низовая метель и её способность к насыщению. Условной границей снегопереноса была установлена высота в 10 метров над поверхностью, и считалось, что выше этой высоты может подниматься лишь несущественное количество снега [1]. В процессе изучения покровных ледников Гренландии у исследователей сформировалось понимание, что снег способен в виде взвеси переноситься на гораздо большие расстояния, поднимаясь на высоты до 300 метров [9]. По этим причинам многие авторы указывали на существование

«двух школ» изучения снегопереноса – советской (Дюнин А.К.) и австралийской (Loewe F.).

История изучения снегопереноса в России и мире

До середины XIX века не существовало задокументированных фактов об изучении снегопереноса. В истории встречаются редкие упоминания о наблюдении за снегом и льдом из удалённых по расстоянию и временному отрезку истории мест. Первое из известных научных исследований свойств снега провёл Петров В.В. в своей работе «Наблюдения над выпарением снега и льда в тенистом месте при различных градусах холода» (1812). Во второй половине столетия из-за повсеместного развития железнодорожного транспорта инженеры начинают решать прикладные вопросы – защита путей и подвижного состава от различных угроз. В Российской Империи и США одним из важнейших вопросов безопасности становится вопрос защиты от переноса снега. В 1878 г. инженер Золотницкий Э.Л. публикует работу «О снежных заносах», в которой он доказал, что преобладающее количество метелевого снега перемещается непосредственно у поверхности снежного покрова. Уже в 1883 г. Воейков А.И. публикует работу, с которой, можно считать, начинает своё становление наука снеговедение – «Снежный покров, его влияние на почву, климат и погоду». В 1886 г. Andree A. на Шпицбергене проводит первые метелемерные наблюдения, а в 1891 г. в Российской Империи Войековым А.И. проводятся первые регулярные снегомерные съёмки.

XX век начинается с изобретения метелемера Кузнецова, в Северной Америке Church J.E. в 1905 г. начинает систематические наблюдения за снежным покровом. В 1911 г. опубликована работа Жуковского Н.Е. «О снежных заносах» и совместно с Чаплыгиным С.А. инженеры вели разработки по теории метели, представляя метель как двухфазный поток и пытаясь связать едиными закономерностями явления снежных заносов и заиливания рек. В 1913 г. инженер Долгов Н.Е. формулирует первые законы переноса снега:

- метель начинается при вполне определённой для данных условий скорости ветра;
- снежные и почвенные частицы, принимающие участие в изменении рельефа поверхности снежного покрова, переносятся в непосредственной к ней близости.

Продолжается изучение прикладных вопросов и особенностей переноса снега в сельском хозяйстве и безопасности на транспорте, появляются первые работы по лавинам и продолжается изучение ледников Гренландии.

К 1930 г. мир прошёл большой путь: за этот период развились два новых вида транспорта (автомобили и самолёты), были изобретены новые методы зондирования Земли, которые в следующее тридцатилетие очень сильно помогли в решении научных проблем. Арктика была уже достаточно хорошо изучена, и к тому моменту научное сообщество начало активно готовить программу нового полярного года.

Следующие 30 лет (1930–1960 гг.) можно назвать периодом становления научных представлений о метелевом переносе снега. По всему миру создаются институты и лаборатории, которые начинают систематическое изучение снега и различных аспектов снегопереноса, применительно к задачам гидрологии, гляциологии, мерзлотоведения. Также начинают формироваться предпосылки к формированию отдельной отрасли науки, занимающейся непосредственно фундаментальными и прикладными проблемами снегопереноса – снеговедению.

В последующем активное развитие всех отраслей промышленности и запуск первого искусственного спутника Земли, приуроченного к Международному геофизическому году (МГГ) в 1957 г., привели к началу новой эры – спутникового дистанционного зондирования Земли, что позволило проводить наблюдения за снежным покровом и делать выводы о закономерностях его распространения на всей планете.

Как и в прежние годы, научное развитие в этот период проходит неравномерно. И на первый план выходят экономические причины: экономический кризис в европейских странах начала тридцатых годов и, конечно, Вторая мировая война.

Во время войны в СССР множество предприятий и различных институтов было эвакуировано за Урал. И в послевоенный период территории Сибири, Дальнего Востока, в том числе возвращённые территории Сахалина и Курил, нуждались в развитии транспортной инфраструктуры и, соответственно, её защиты от снега, снегопереноса и лавин. Над этими вопросами начали работать множество учёных и одним из них был профессор Дюнин А.К., который впоследствии напишет свою фундаментальную работу «Механика метелей».

В следующие 30 лет (1960–1990 гг.), как можно судить на основании анализа работ учёных этого периода, о снеге и вопросах переноса снега основные представления уже были сформированы, построены первые математические модели, все возможные континенты уже изучены на предмет понимания основных характеристик снежного покрова и вопросов его переноса метелями. Так, в докладе (Mellor, 1974), посвящённом инженерным свойствам снега, «детально обсуждались его структурные и текстурные характеристики, а также приводились обобщения данных механических, электрических, оптических и тепловых свойств».

В это время в названиях работ всё чаще стали фигурировать такие слова как «управление», «проектирование/дизайн», «прогноз» и это не удивительно, ведь к пониманию основных законов описывающих поведение снега в различных условиях теперь добавляются возможности современных технологий: спутники с высокой разрешающей способностью, позволяющей строить прогностические модели и дистанционно наблюдать за всей поверхностью планеты без необходимости физического присутствие в районе исследований. Новые приборы, как например, фотоэлектронные или ультразвуковые метелемеры, позволяют в автоматическом режиме собирать всё большее количество данных о свойствах снега, переносимого ветром. Развитие ЭВМ как в западном мире, так и в Советском Союзе, открывает новые возможности в обработке и накоплении данных.

В зарубежном сегменте можно выделить несколько важных работ в этот период по изучению вертикального распределения снежных частиц в воздухе (Takeuchi M. (1980), Shmidt R.A. (1982)) – один из наиболее сложных в плане измерения характеристик снегопереноса. Как раз в таких работах использование новых метелемеров даёт наилучшие результаты, ведь как писали Дюнин А.К. и Colbeck S.C. [17] в своих трудах, одной из самых важных проблем в изучении снега и законов его перемещения является небольшой объём данных для анализа и недостаточное количество исследовательских площадок для сбора этих данных, в то время как автоматические метелемеры и автоматические климатические станции были способны решить эту проблему.

Событием начала следующего периода (1990–2020 гг.), оказавшим значительное влияние на развитие научных исследований, однозначно можно назвать распад Советского Союза. Уничтожение советского научного флота, сокращение финансирования научной деятельности и бедственное положение многих учёных того периода нанесли сильнейший удар по наукам, изучающим снег и лёд. Конечно, удар был нанесён и по другим научным дисциплинам, но, пожалуй, в геофизических науках как нигде важны систематические и синхронные наблюдения за различными составляющими географических оболочек в максимально большем количестве точек планеты. На рисунке 2, составленном автором по материалам изучения работ, касающихся исследований в области метелевого переноса снега за 1,5 прошедших века, можно увидеть, что с 1990 г. на такой огромной территории, как Россия, практически не велись крупные работы по изучению метелей.

Однако для остального мира 1990-е гг. – золотое время в научном плане. Широкие возможности, которые дали современные компьютеры, использовались учёными для разработки всё более мощных и сложных числовых моделей.

В смежных науках, как например в метеорологии, активно продолжают разрабатывать прогностические модели и встраивать их в системы прогнозирования погоды. Для примера можно отметить систему ESP Европейского центра

среднесрочных прогнозов погоды, которая к 1994 г. уже использует ансамблевое прогнозирование – это метод, объединяющий прогнозы нескольких моделей для повышения точности и устойчивости конечного прогноза.

В 2000–2010 гг. были развиты технологии детального анализа атмосферных и приповерхностных процессов в различных регионах мира. Важным событием стал 4-й Международный полярный год (МПГ) (2007–2008 гг.), который способствовал восстановлению полярных станций и проведению крупных антарктических экспедиций, что положительно повлияло на российскую науку.

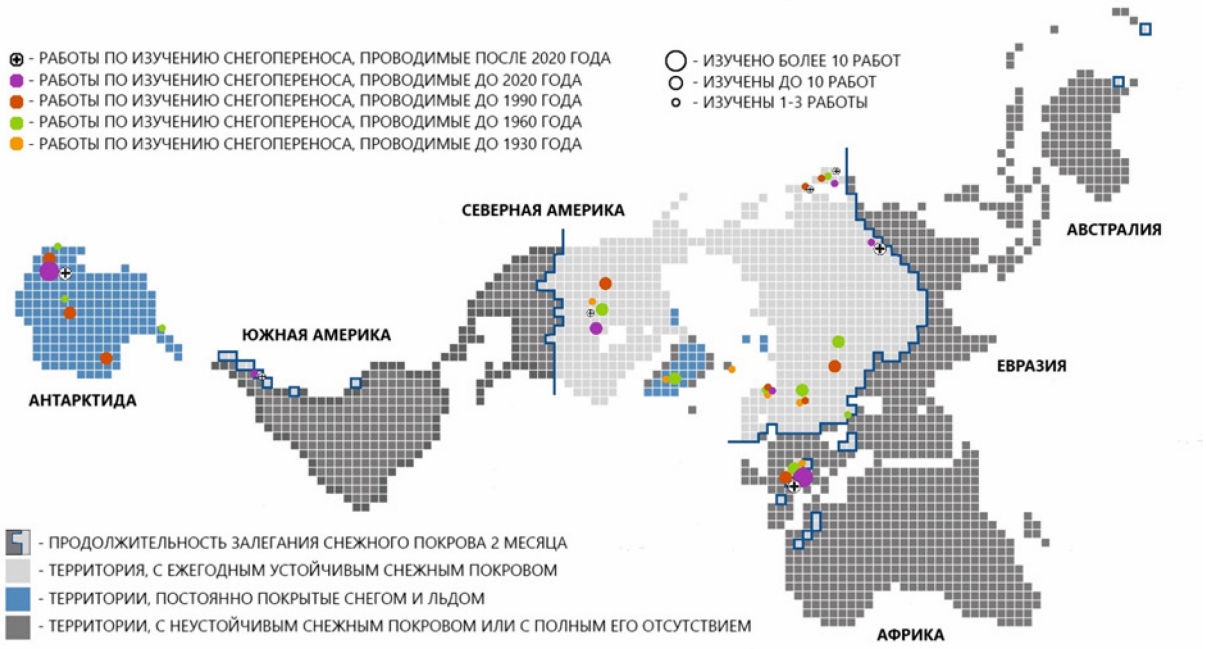


Рисунок 2. Карта мира с указанием мест проведения исследований метелевого переноса снега в различные исторические периоды

Figure 2. World map indicating the locations where snowdrift transport studies were conducted in various historical periods

Интересно посмотреть не только на новые возможности, которые открыли перед учёными современные цифровые технологии, но и на проблемы, которые выделила группа учёных в статье 2018 г. «Европейская горная криосфера: обзор ее текущего состояния, тенденции и будущие вызовы». В данной работе выделяются следующие проблемы:

- существующие климатические модели имеют низкое пространственное разрешение, что не позволяет точно отображать мелкомасштабные процессы в горных районах. Это приводит к неточностям в моделировании фазовых переходов осадков и других важных процессов;

- изменения в криосфере могут привести к каскадным процессам, таким как образование новых озёр, оползней и селей, которые могут иметь катастрофические последствия для нижележащих территорий;

- существуют большие неопределённости в оценке твёрдых и жидких осадков в высокогорных районах, что связано с низкой плотностью осадкомерных станций и большими погрешностями в наблюдениях из-за недоучёта осадков, особенно твёрдых;

- данные наблюдений за криосферой часто имеют ограниченную доступность из-за высоких логистических и финансовых затрат на их сбор, а также из-за отсутствия открытой политики обмена данными, что ограничивает возможности для проведения крупномасштабных исследований и моделирования;

- существующие модели криосферы имеют ограничения в точности и разрешении, что затрудняет прогнозирование будущих изменений в криосфере и их последствий.

В целом, эти проблемы подчеркивают необходимость комплексного подхода к

исследованию криосферы, включая улучшение моделей, сбор и обмен данными, а также понимание сложных взаимодействий между различными компонентами криосферы и климатической системой.

В последние 5 лет можно выделить тенденцию к обобщению результатов ранее проведённых наблюдений. В это число входит: работа 2021 г., написанная группой авторов, которые анализируют тенденции изменения глубины снега в Европейских Альпах в период с 1971 по 2019 гг.; работа также 2021 г., в которой группа учёных анализирует метеорологические данные, данные по снегу и почве, полученные в период с 2013 по 2019 гг.; в работе 2024 г. проводится анализ непрерывных метеорологических и снежно-гидрологических измерений, полученных тремя автоматическими станциями в период с 2013 по 2023 гг. в австрийских Альпах.

Эта граница между периодами (2020 г.) была выбрана по следующим причинам: с одной стороны в это время политическая обстановка в мире становится менее стабильной, а с другой – человечество получает доступ к мощнейшим компьютерным технологиям и большим языковым моделям (LLM). Кажется, что с одной стороны, идёт фрагментация научного сообщества из-за нестабильной политической обстановки, с другой стороны – перед учёными открываются невероятные возможности благодаря цифровым технологиям.

В будущем научное сообщество имеет возможность вновь сплотиться под флагом всестороннего изучения Земли, чему может способствовать проведение 5-го Международного Полярного Года (2032–2033 гг.). С учётом того, что на планете уже функционируют целые фабрики, производящие роботов без участия людей, семимильными шагами развиваются нейронные сети, то моменту проведения 5-го МПГ возможно будут разработаны уникальные инструменты для синхронного и продолжительного исследования даже самых труднодоступных регионов планеты, чтобы полученные данные будущие учёные могли использовать в своих исследованиях, как это делали мы в начале 21 века с данными предыдущих результатов МГГ.

Таблица 1. Учёные, которые участвовали в накоплении знания о метелевом переносе в различные исторические периоды

Table 1. Scientists who contributed to the accumulation of knowledge about snowdrift transport in different historical periods

Исторический период	Имена исследователей снегопереноса	К*
До 1930 г.	Злотницкий Э.Л., Andree A., Войеков А.И., Кузнецов В.В., Долгов Н.Е.,	14/11
1930–1960 гг.	Изюмов Н.Н., Loewe, F., Finney E.E., Хргиан А.Х., Seligman, G., Бялобженский Г.В., Дюнин А.К., Мельник Д.М., Рихтер Г.Д., Yosida, Z.	92/17
1960– 1990 гг.	Mellor, M., Radok U., Budd, W.F., Tabler, R.D., Котляков В.М., Colbeck S.C., Kobayashi D., Schmidt R.A., Takeuchi, M., Kind, R.J.	242/25
1990– 2020 гг.	Guyomarc'h G, Lehning M, Bintanja, R., Niaam-Bouvet F., Taylor, P., Liston, G.E., Doorschot, J., Nemoto, M., Nishimura, K., Mott, R., Groot Zwaaftink, C. D., Palm, S.P., Vionnet, V., Lenaerts J.T.M., Gromke C., Amory C.	416/14
С 2020 г. по настоящее время	Ayala, A., Voordendag, A.	36/2

К* – количество статей за выбранный период, которые удалось проанализировать: количество работ по метелевому переносу снега всего по миру (числитель) и количество работ по переносу снега из РИ, СССР, РФ (знаменатель).

Методы исследования и оборудование

Для изучения вопросов, касающихся метелевого переноса снега, основным методами исследования остаются полевые работы. Кроме того, в процессе развития представлений о физических законах перемещения снежной массы потоками воздуха были проведены многочисленные лабораторные эксперименты, созданы методы дистанционного зондирования (ДЗЗ) и методы математического моделирования процессов, однако результаты, полученные этими

методами непременно необходимо проверять на натурных экспериментах в различных географических условиях ввиду сильнейшего взаимного влияния множества параметров на характер снегопереноса.

Ключевую роль в натурных исследованиях играют инструментальные возможности наблюдателя. На сегодняшний день до сих пор не разработано достаточно точное измерительное оборудование, способное непрерывно осуществлять сбор данных об объемах переносимого снега во времени и в пространстве. В связи с этим исследователи вынуждены совмещать одновременно несколько различных методов натурных наблюдений. Большое разнообразие инструментов и методов исследования в совокупности с различными целями и физико-географическими условиями исследуемой территории приводит к большим погрешностям в расчетах и значительной разнице между рассчитанными по различным методикам данными. Кроме того, зачастую сбор данных необходимо проводить в сложных условиях высокогорья, удалённых континентальных районах или условиях полярных областей, что также негативно сказывается на качестве и регулярности наблюдений. К примеру, в работе [18] исследователи имея современные акустические сенсоры и современное оборудование для автоматического наблюдения за снегом и атмосферными параметрами для своих расчётов используют только те периоды наблюдений, где присутствовал оператор, который верифицировал данные, полученные сенсорами своим визуальным наблюдением. Так, например, в работе [19] исследователи указывают на возможность использования для расчётов динамики изменения поверхностного баланса масс антарктических льдов данных собранных в Антарктиде во время проведения МГГ с 1957 по 1958 гг. ввиду их большей репрезентативности по сравнению с современными (2012 г.) данными, поскольку во время МГГ сбор данных осуществлялся синхронно на 18 полярных станциях на протяжении всего года.

Историю инструментальных исследований можно вести с конца XIX века, когда начали использовать первые примитивные ловушки для сбора перенесённого снега в виде обычных ящиков. В 1900 г. был предложен прибор для улавливания снега не только у поверхности, но и на высоте – метелемер Кузнецова (рисунок 3а). Так, в Советском Союзе в 1930-х гг. и позже использовали метелемеры подобных конструкций – ВО-2 (рисунок 3б) и ЦПЗ-1,2 (рисунки 3в и 3г). Существовали и другие модели метелемеров, использовавшиеся реже и только в лабораторных условиях.

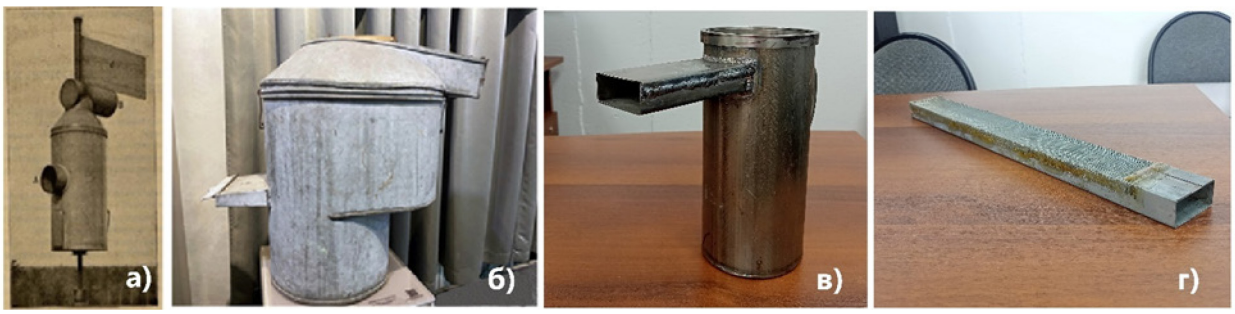


Рисунок 3. Примеры первых метелемеров: метелемер Кузнецова (1900) [20] (а); метелемер ВО-2 (1931)(б); ЦПЗ-1 и ЦПЗ-2 (1982) (в, г)

Figure 3. Examples of early snow gauges: Kuznetsov's snow gauge (1900) [20] (a); VO-2 snow gauge (1931) (b); TsPZ-1 and TsPZ-2 snow gauges (1982) (c, d)

В западной научной литературе автору не удалось найти конкретные названия некоторых метелемеров, например *ловушек для снега* / *snow trap*, которые применяют в своих наблюдениях коллеги. Общий вид таких ловушек показан на рисунке 4г. В целом, принцип улавливания снега для всех ловушек одинаков. Ловушка состоит из жесткой рамки различных форм и размеров, на которую прикрепляется мешок из материалов, способных пропустить воздух. Через рамку в мешок задувается ветер со снегом, затем через мелкие отверстия воздух из мешка выдувается, а

снежные частицы в нем задерживаются. На рисунках 4а, г* изображена вертикальная стойка сразу с несколькими подобными ловушками, расположенными на разных высотах над поверхностью.

Инструментальное измерение такими метелемерами представляет собой тривиальную, но вместе с тем крайне трудоёмкую задачу. Во-первых, требуется постоянное присутствие наблюдателя в сложных и опасных для жизни условиях. Во-вторых, необходимо точно контролировать время заполнения каждого метелемера, затем взвешивать снег и очищать метелемер от него. Нередко промежуток между измерениями во время сильной метели может составлять менее 2 минут в зависимости от конструкции метелемера. Отдельно можно отметить и саму проблему взвешивания объёма снега, накопившегося в метелемере. Перечисленные факторы приводят к неточностям измерения, их эпизодичности, а порой и невозможности их проведения в особенно неблагоприятных погодных условиях. Работы на большой площади с подобными метелемерами практически невозможны, а измерения, проводимые при этом на разных высотах, еще и осложняются существенно меньшим количеством переносимого снега. Время заполнения метелемеров, расположенных на разных высотах, может разниться на несколько часов.

Настоящий бум развития метелемеров случился в период проведения МГГ, когда на ряду с метелемерами-«ловушками» и механическими метелемерами появились метелемеры-«счётчики», которые представляют собой фотоэлектрический прибор, позволяющий оценивать массу снега в зависимости от изменения интенсивность пучка света (метелемер Орлова, метелемер Landon Smith'a) [21]. Позднее были изобретены ультразвуковые датчики, регистрирующие начало наступления приповерхностного метелевого переноса (FlowCapt (1999) и ему подобные приборы) (рисунок 4д). Важно отметить, что скорее всего не верно называть все приборы именно метелемерами, т.к. каждый из них имеет свои особенности и применяется для различных целей.

Современное инструментальное направление невозможно представить себе без автоматизированных станций, на которых расположены различные приборы по автоматическому сбору данных о параметрах окружающей среды, необходимые для выявления особенностей, влияющих на снегоперенос. Поступление постоянных максимально объёмных данных напрямую влияют на качество дальнейшей разработки всевозможных моделей переноса снега, на точность параметризации и установление максимально проработанных зависимостей между различными переменными.

История автоматических погодных станций началась ещё в предвоенные годы второй мировой войны во многих странах северного полушария [25]. Современная автоматическая станция для продолжительных наблюдений за снегопереносом имеет вид как на рисунке 4з.

Так как объём снегопереноса изменяется с высотой, то обычно автоматическая станция представляет из себя вертикальную конструкцию / *tower* на которой расположены на разных высотах анемометры (с флюгером или без), и рядом установлен один или несколько метелемеров, состоящих из нескольких сегментов, в зависимости от типа устройства. Дополнительно устанавливаются, по возможности и в зависимости от целей наблюдения, датчики температур снега, почвы, всевозможные камеры в том числе и высокоскоростные. Набор дополнительных инструментов может существенно отличаться, но в целом, внешний вид таких автоматических станций имеет общую структуру, изображенную на рисунке 4з, а приборы, которые обычно на них располагаются, изображены на рисунках 4б–ж.

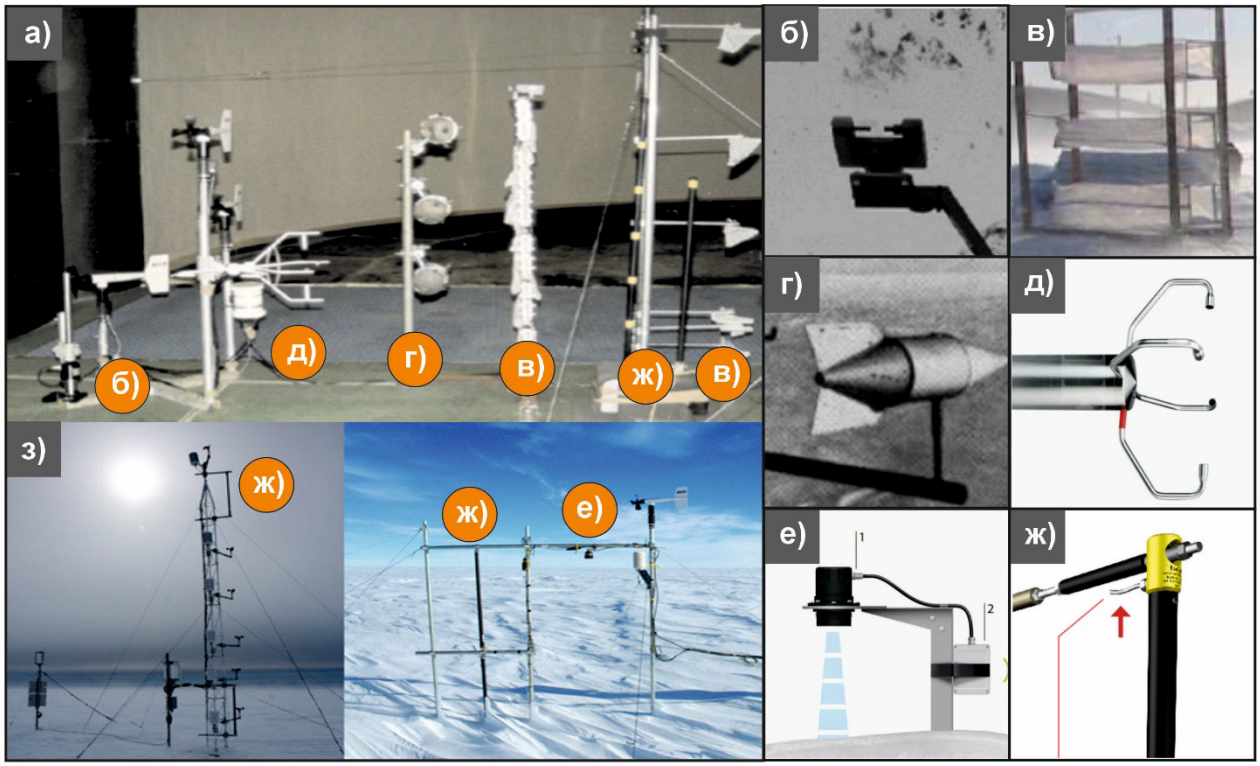


Рисунок 4. Расстановка различных снегомерных приборов в лабораторной установке Франция [22] (а) и конструкции метелемеров и ловушек: изображение метелемера SPC [23] (б); снежные ловушки, расположенные на разных высотах из [24] (в); изображение метелемера Mellor M. [9] (г); примерное изображение ультразвукового анемометра – прибора для измерения параметров ветрового потока, который часто устанавливается на современные автоматические научные установки (д); изображение метелемера FlowCapt[1] (ж); принципиальная схема датчика высоты поверхности снега (е); автоматические станции для измерения снега и снегопереноса из [8] (з)

Figure 4. Arrangement of various snow measuring instruments in a laboratory setup in France [22] (a) and images of snow drift measurement system: image of the SPC snow gauge [23] (b); snow traps, located at different heights [24] (c), image of the Mellor M. snow gauge [9] (d); approximate image of an ultrasonic anemometer – a device for measuring wind flow parameters, which is often installed on modern automatic scientific installations(e); image of the FlowCapt snow gauge[1](f); schematic diagram of a snow surface height sensor(g); automatic stations for measuring snow and snow transport [8] (h)

Следующий важный метод изучения снегопереноса – лабораторные эксперименты. Так как метель – это только один из видов ветрового переноса вещества, то множество экспериментов было проведено с использованием песка и частиц почвы. Самые известные лабораторные эксперименты с песком проводились Bagnold R.A. (1941), перенос почвы изучал Chepil W.S. (1930), перенос снега в лабораторных условиях изучал Дюнин А.К. (1963). Позже лабораторные эксперименты начали проводить как в больших лабораторных аэродинамических трубах / *wind tunnel* (рисунок 5г), так и в маленьких локальных снеговетровых установках (рисунок 5в). Такие трубы и установки могут быть различной длины, могут быть замкнуты или иметь конечную длину, могут иметь маленький внутренний объём или большой, в котором можно обдувать полноразмерные макеты различных объектов. В одной из частей канала находится ветрогенератор, который создаёт регулируемый по силе ламинарный или турбулентный воздушный поток. Имеется также зона загрузки, в которой помещают материал для эксперимента (частицы песка, почвы или снега). В канале существуют смотровые окна или весь канал создан из прозрачных материалов

[1] ISAW Products: Weather Sensors for Extreme Environments. https://www.isaw-products.com/flowcapt-fc4/

для визуального наблюдением за переносом и накоплением частиц. В канале могут быть расположены различные приборы: датчики для определения фактических параметров ветрового потока и ловушки для определения объёмов перенесённого вещества (рисунок 5а).

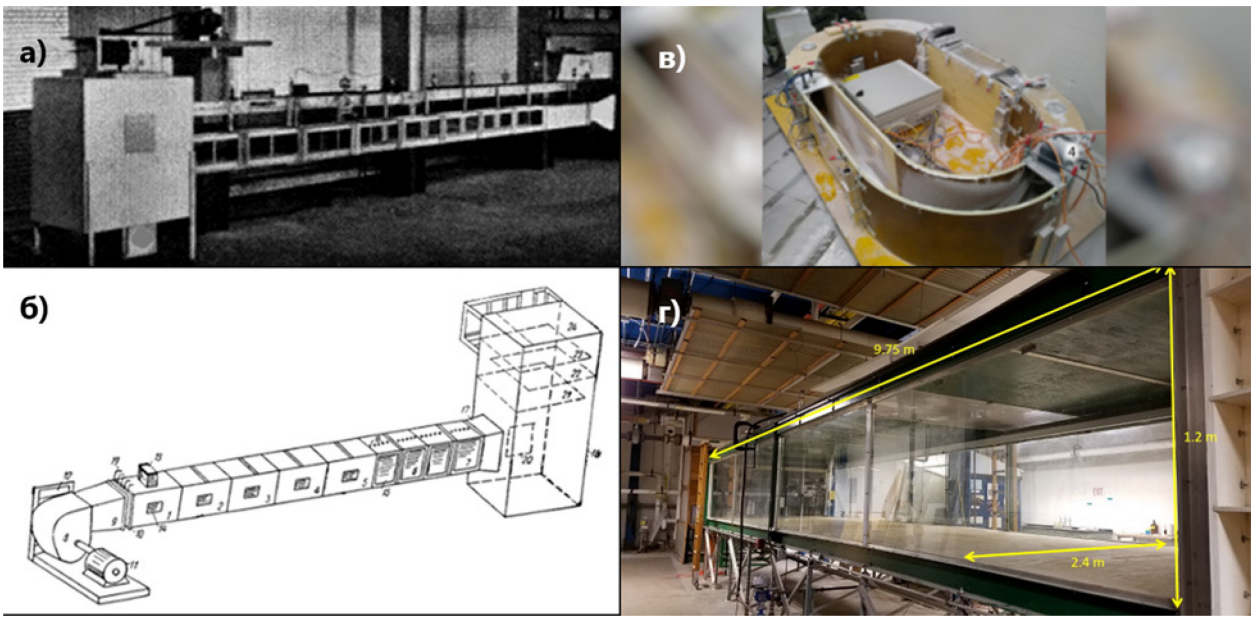


Рисунок 5. Различные типы лабораторных установок по моделированию ветрового переноса частиц в приповерхностном слое: установка Bagnold R.A. (1941) – перенос частиц песка, размер установки: длина 4 метра, размер секций 0,3х0,3 м (а), схема установки Дюнина А.К. (1963) (размеры компоновок установки длина/сечение: 6,8 м / 0,15х0,15 м; 8,6 м / 0,32х0,32 м и 21 м / 0,42х0,50 м) здесь и далее перенос частиц снега (б), установка расположена в Давосе (Швейцария) (2024) [13] (в), установка CRREL EWT г. Ганновер, США (2016) (размеры установки 2,4 м х 1,2 м х 9,7 м) (г)

Figure 5. Various types of laboratory setups for modeling wind transport of particles in the near-surface layer: setup by Bagnold R.A. (1941) – transport of sand particles, setup size: length 4 meters, section size 0.3x0.3 meters(a); diagram of the setup by Dyunin A.K. (1963) (setup layout dimensions length/section: 6.8 m / 0.15x0.15 m; 8.6 m / 0.32x0.32 m and 21 m / 0.42x0.50 m) here and further transport of snow particles (b); setup located in Davos, Switzerland (2024) [13] (c); CRREL EWT setup in Hanover, USA (2016) (setup dimensions 2.4 m x 1.2 m x 9.7 m) (d)

По мере развития технологий аппаратура, которая применяется для отслеживания результатов лабораторных экспериментов, менялась. В первых экспериментах 1940–50-х гг. редко использовалась фотография, тогда как с 1970-х гг. появились первые работы (рисунок 1б)) в которых запечатлены траектории сальтации частиц снега. Уже в наше время развитие фото-видео фиксации вышло на уровень фотографирования момента столкновения отдельно-летящей частички снега с поверхностью и фиксации каждого фрагмента, который откололся от частицы во время столкновения (рисунок 1в).

Кроме целей фотографирования в лабораторных исследованиях, а в последнее время и в натурных экспериментах [7], используют техники экспериментальной гидродинамики − PIV (цифровая трассерная визуализация (ЦТВ)) и BOS (теневой фоновый метод (ТМФ)) (рисунок 6). В ЦТВ выделяют планарные методы, позволяющие получать как две компоненты скорости (продольную и поперечную), так и трёхмерное поле скоростей [25]. Техника ТМФ заключается в использовании метода количественных измерений мгновенных распределений температуры, плотности и концентрации примеси в течениях прозрачных жидкостей и газов. Измерение этими методами дают ~10^4 – 10^6 значений на кадр. Более того данные методы либо полностью бесконтактные (ТМФ), либо почти бесконтактные (ЦТВ), что очень важно как для экспериментальной гидродинамики, так и для экспериментов со снеговетровым потоком.

Метод ЦТВ основывается на статистическом анализе перемещений частиц, которые движутся вместе с исследуемым потоком. Эти частицы визуализируют поток в течение короткого временного интервала, когда они регистрируются в определённой плоскости с помощью оптического ножа. В процессе измерения оптический нож, создаваемый лазерным излучением, формируется в виде двух коротких импульсов, разделённых определённым временным интервалом. Результатом применения метода являются мгновенные поля скорости потока [27].

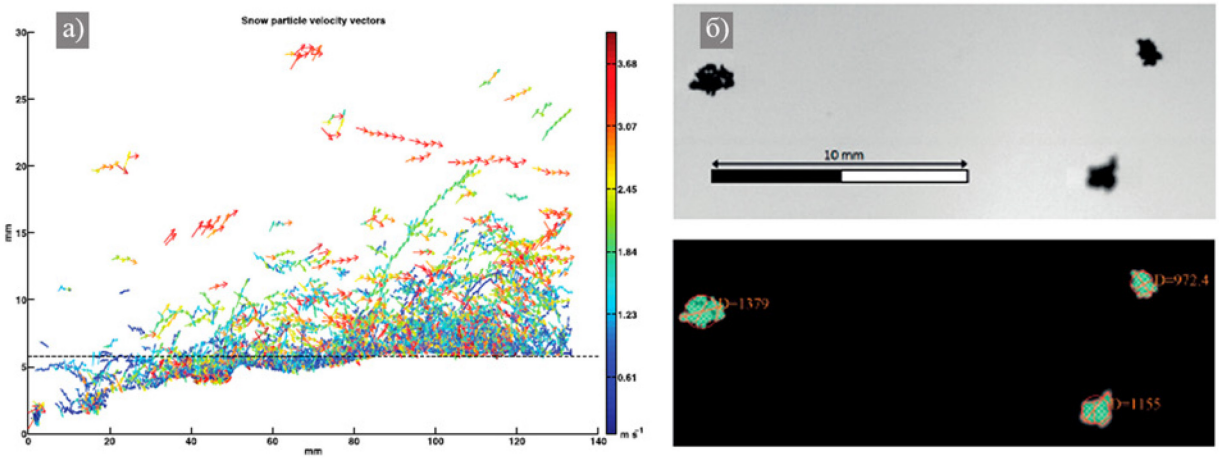


Рисунок 6. примеры визуализации данных [7], полученных способом ЦТВ (а) и изображение, полученное методом ТМФ (б) (сверху) первичное изображение и (снизу) рассчитанные значения диаметров частиц [28]

Figure 6. Examples of data visualization [7], obtained by the PIV method (a) and image obtained by the PTV method (b) (top) primary image and (bottom) calculated values of particle diameters [28]

Лабораторные исследования проводились как для физического моделирования процессов (например, лабораторные эксперименты Finney E.A. (1939) для моделирования снегозаносимости различных участков скоростных дорог), так и для теоретических разработок вопросов ветрового снегопереноса (для проектирования защитных сооружений (снегоборьба), сохранения и накопления снега для сельскохозяйственных нужд (снегозадержание)). До 1950-х гг. разработка полуэмпирических формул для расчёта объёмов снегопереноса (Q) базировалась, в основном, на натурных экспериментах, пока в СССР Дюнин А.К. по материалам экспериментов на снеговетровой установке (рисунок 5б) не разработал теорию метели [1] – фундаментальный труд, который и сейчас используется учёными по всему миру. В книге описаны теории: снегоборьбы, снегозадержания и снегосборного бассейна.

В дальнейшем лабораторные установки служили как целям проверки параметров различных метелемерных приборов (рисунок 4а), так и для параметризации сложных физических процессов, связанных с метелевым переносом снега.

Параметризация – это математический процесс, заключающийся в выражении состояния системы, процесса или модели в виде функции некоторых независимых величин, называемых параметрами. Состояние системы обычно определяется конечным набором координат, и параметризация, таким образом, состоит из одной функции нескольких действительных переменных для каждой координаты. Количество параметров равно количеству степеней свободы системы.

После разработки необходимой теоретической базы и проведения множества натурных и лабораторный наблюдений начинается следующий шаг – численное моделирование. Главной задачей любой модели является максимально точный прогноз поведения того или иного процесса.

Прогнозирование процессов снегопереноса важно для решения задач в метеорологии,

гидрологии, гляциологии, транспортной безопасности. Соответственно существуют метеорологические, гидрологические, гляциологические модели переноса снега, а также модели переноса снега для транспортной инфраструктуры.

Современные численные модели – сложные математические системы, которые решают дифференциальные уравнения для прогнозирования. Подобные модели обрабатывают значительные объёмы данных и требуют значительных вычислительных мощностей.

Метеорологические модели можно поделить на глобальные и региональные. К глобальным моделям можно отнести ECMWF (Европейский центр среднесрочных прогнозов), GFS (Глобальная система прогнозирования). К региональным относятся NAM (Североамериканская мезомасштабная модель), MM5 (Мезомасштабная метеорологическая модель пятого поколения). Модели используют данные о плотности, влажности, давлении, температуре и скорости перемещения воздушных масс, которые получают с помощью наземных и дистанционных наблюдений.

В гидрологии, для которой данные о переносе снега имеют очень важное значение, разработаны модели следующих типов: эмпирические, физические и концептуальные. Эмпирические модели работают с статическими зависимостями между входными и выходными параметрами; физические модели основываются на физических законах и требуют достаточно подробных данных; концептуальные модели используют упрощённые физические представления о процессах, сочетают эмпирические и физические элементы.

Гидрологические модели могут быть глобального, регионального, локального масштаба с разрешением от 100 км до первых десятков метров.

Гляциологические модели решают множество задач от моделей ледниковой динамики до палеогляциологии. Разрешение обычно соответствует масштабу моделирования 50 км для глобальных (PISM), до 1 км –для региональных (Elmer/Ice, MAR), и 1 метр и менее – для локальных.

Для вопросов изучения переноса снега подходит разрешение в десятки, а лучше единицы метры. Существует множество моделей, описывающих процесс снегопереноса через моделирование с различными параметрами уровней сальтации и взвеси, подключаемые в качестве модулей в более крупные модели снежного покрова, метеорологические модели или гляциологические, которые в свою очередь, включены в ещё более крупные модели.

Первой моделью для описания переноса снега считается модель PBSM, которая была разработана для прерий и учитывала перенос и аккумуляцию снега с учётом длины разгона метели и особенностей шероховатости поверхностного слоя. Эта модель достаточно хорошо работает для пологих участков местности с достаточной длиной разгона метели, но плохо работает в горной местности [29]. В дальнейшем эта модель была доработана для учёта особенностей более сложного рельефа (DBSM). На основании этой модели были предложены в будущем другие модели, адаптированные под горный рельеф PIEKTUK и SNOWTRAN 3D. Общее количество моделей, позволяющих рассчитывать различные физические процессы, связанные со снегом, к началу 2010 гг. насчитывает более 1500 тысяч [29].

Как отмечает [7] PBSM-подобные модели являются стационарными моделями, т.е. определенные статистические характеристики модели остаются неизменными во времени или пространстве и не учитывают в своих расчётах термодинамические взаимодействия в приповерхностном слое. По его мнению, процесс снегопереноса не может описываться стационарными моделями в виду своей временной и пространственной изменчивости. Так как метель – турбулентный поток, то в современных моделях снегопереноса часто используется численный метод LES (моделирование больших турбулентных вихрей - Large Eddy Simulation). LES применяется для более точного понимания и предсказания сложных динамических процессов, связанных с перемещением снега ветром. Кроме LES существует также метод DNS (прямое численное моделирование – Direct Numerical Simulation),

который также применяется для моделирования турбулентных потоков. Разница между двумя методами в том, что последний рассчитывает все масштабы турбулентных вихрей, что требует серьёзных вычислительных мощностей. Метод LES рассчитывает только крупные вихри, а для мелких вихрей использует различные упрощения.

Для примера отличия расчёта поля переноса снега, в том числе слоя сальтации, можно посмотреть изображения из работы [30], где видна неоднородность распределения скоростей перемещения смоделированных снежных частиц в горизонтальной плоскости (рисунок 7а, 7б) и пример отличия поведения частиц с учётом турбулентного взаимодействия и без (рисунок 7в).

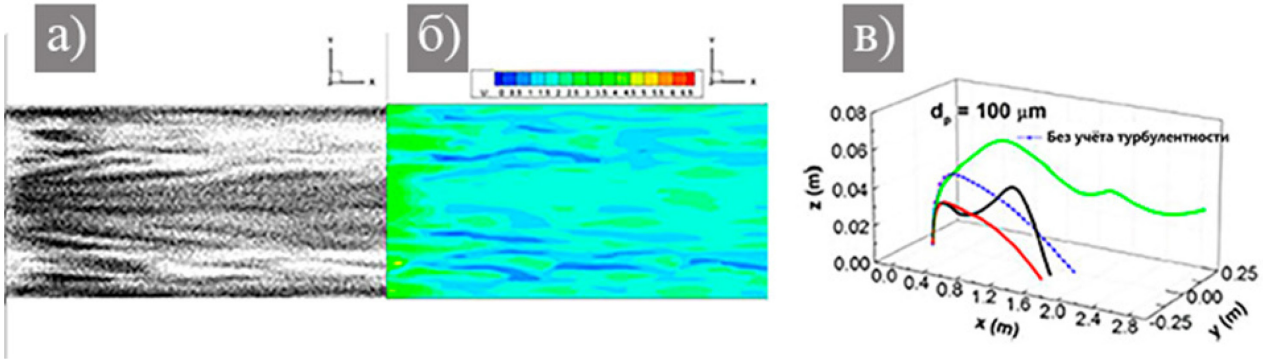


Рисунок 7. Визуализация горизонтального распределения смоделированных скоростей сальтирующих частиц (а, б), 3Д-визуализация возможных траекторий частицы с учётом турбулентной теории потока и без (синий пунктир) (в) [30]

Figure 7. Visualization of the horizontal distribution of simulated velocities of saltating particles (a, b); 3D visualization of possible particle trajectories considering turbulent flow theory and without (blue dashed line) (c) [30]

На современном этапе развития техники возможно выполнение моделирования течения различных сред на персональных компьютерах. Моделированием различных потоков занимается вычислительная гидродинамика (CFD – Computational Fluid Dynamics). Этот подраздел механики сплошных сред позволяет учитывать в расчётах передачу тепла и массы, фазовые изменения вещества, механическое движение, напряжения и деформацию материалов под воздействием среды. Расчёты, проводимые вычислительной гидродинамикой, помогают учёным из разных областей науки заменить реальные эксперименты математическими расчётами, и тем самым сократить сроки и стоимость проектирования снегозадерживающих решений или оборудования и изучения поведения необходимых процессов. Сами расчёты производятся в CFD-программах. В литературе по вопросам снегопереноса [31–32] автором были встречены следующие CFD-программы: ABAQUS, ANSYS, MATLAB, Cast3M, SigmaFLOW, Flow Vision. В инженерных программах SolidWorks и Inventor есть возможность подключить дополнительные модули для CFD-расчётов. У всех упомянутых программ общим является использование для расчётов метода конечных элементов (МКЭ) (finite-element method (FEM)) (рисунок 8). МКЭ – это численный метод решения задач прикладной физики и инженерии, основанный на разбиении сложной геометрической области на множество более простых подобластей, называемых конечными элементами. Этот подход позволяет сводить сложные дифференциальные уравнения в частных производных к системе алгебраических уравнений, что существенно упрощает решение задач со сложной геометрией и граничными условиями. МКЭ в моделировании снежного покрова используется с 1970-х гг. [31].

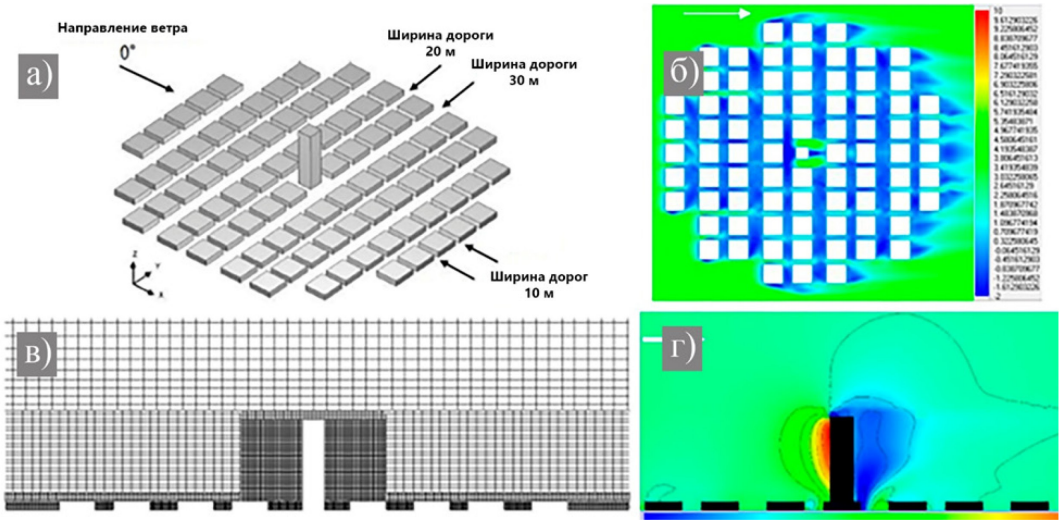


Рисунок 8. Пример CFD-моделирования ветрового потока с использованием МКЭ (FEM) (подобным образом выглядят изображения моделирования снеговетрового потока) [32]: план городской застройки с улицами и дорогами, и высоким зданием посредине (а); изменение скорости ветрового потока внутри городской застройки в плане (б); схема уменьшения расчётных областей при использовании метода МКЭ по мере приближения к препятствию (в); визуализация изменения скорости ветрового потока у препятствия (г)

Figure 8. Example of CFD modeling of wind flow (images of snow wind flow modeling look similar) [32]: a plan of urban development with streets and roads with high-rise building in the middle (a); change in wind flow speed within urban development in plan view (b); Scheme of computational domain reduction when using the FEM method as approaching an obstacle (c); visualization of wind flow speed changes near an obstacle (d)

Новым направлением для исследования именно снегопереноса становится спутниковое зондирование. Хотя для нужд метеорологии и гидрологии спутники используются ещё с 1960-х гг., изучение снегопереноса требует высокого разрешения входных данных. Так, в 2004 г. спутником ICESat было заснято событие переноса огромного количества снега с Антарктического побережья, что стало условной поворотной точкой в понимании более полного баланса масс антарктических ледников. Кроме того, стало понятно, что огромные объёмы выпавшего снега способны подниматься на значительные высоты и переноситься на очень большие расстояния, что ранее было дискуссионным вопросом (рисунок 9). Верификация на земле происходила с базы «Восток», на которой подтвердили, что событие точно связано с переносом снега.

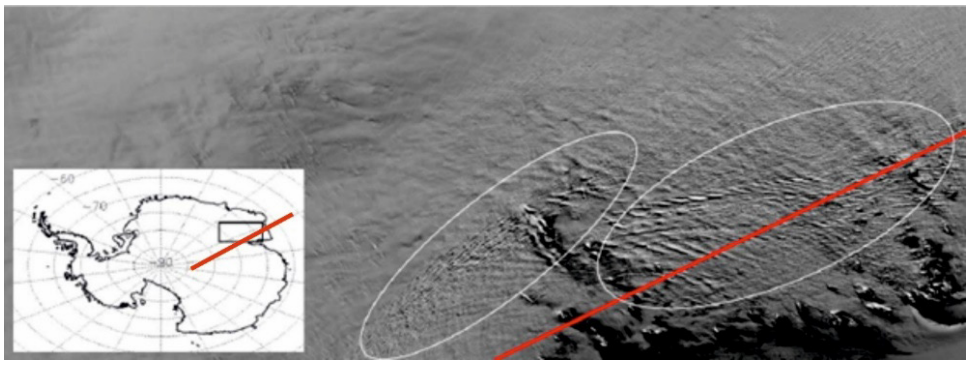


Рисунок 9. Слой перенесённого ветром снега, зафиксированный спутником ICESat 22 февраля 2004 г. над Антарктидой [10]. Белым цветом выделены зоны, которые определили как переносимый ветром снег; красная линия – линия направления переноса снега от центра континента к океану

Figure 9. Layer of wind-transported snow, recorded by the ICESat satellite on February 22, 2004 over Antarctica [10]. Zones highlighted in white indicate areas identified as wind-transported snow; the red line shows the direction of snow transport from the center of the continent to the ocean

После первых успехов в спутниковом зондировании снегопереноса открылись новые возможности в объединении различных моделей – объединение глобальных климатических моделей с региональными. Главной задачей является корректная ассимиляция данных.

Ассимиляция – процесс объединения разнородных наблюдений с результатами численного наблюдения для получения наиболее точной оценки изучаемого явления. Выделяют следующие методы: 1) четырёхмерная вариационная минимизация (4D-Var), суть которого заключается в приближении прогнозной траектории какого-то параметра к наблюдениям путём добавления дополнительных коэффициентов в модель; 2) ансамблевые фильтры Кармана (EnKF) – позволяет учитывать неоднородности в начальных условиях с учётом изменения данных по мере поступления дополнительной информации; 3) гибридные методы сочетают точность вариационных подходов с возможностями ансамблевого моделирования по учёту неоднородностей; 4) ассимиляция нелинейных данных; 5) машинное обучение.

Развитие нейросетей, разрабатываемых с начала 2000-х гг., даёт возможность корректировать с их помощью процесс анализа данных при изучении снегопереноса. Можно выделить следующие типы нейросетей, которые способны выполнять задачи по оценке научных данных о переносе снега: 1) многослойные перцептроны (MLP); 2) сверхточные нейронные сети (CNN); 3) модели учитывающие физическую модель реального мира (PINNs) – встраивание информации о реальных физических процессах не позволяет нейросети выбирать расчёты из выборки, которые противоречат реально возможным значением, что приводит к повышению информативности доступных данных, облегчая поиск правильного решения и даёт хороший уровень обобщения при небольшом количестве обучающих примеров; 4) генеративные модели GANs; графовые нейронные сети (GNN); мультимодальные нейронные сети.

Также получили развитие методы объяснения работы сложных моделей машинного обучения, как например SHAP, которые позволяют количественно оценить вклад каждого признака (фактора) в итоговое предсказание модели для каждого отдельно случая [33].

Обсуждение результатов

Факторы, влиявшие и влияющие на изучение вопроса метелевого переноса снега в мире, имеют как историческую, так и географическую природу: первые исследования разнесены как в пространстве, так и во времени. В зависимости от территории, уровня технического, научного развития и экономического состояния меняется не только направление развития знаний о снегопереносе, но и скорость выработки этого знания.

Можно выделить несколько групп проблем, которые так или иначе влияют не только на выработку нового научного знания о снегопереносе, но и использовании уже полученных знаний: 1) проблемы с терминологией; 2) проблемы с уровнем развития инструментальной базы и получение качественных полевых данных; 3) проблемы качественного моделирования процесса снегопереноса; 4) проблема финансирования; 5) проблема доступа к научным данным; 6) проблема передачи опыта между поколениями учёных; 7) проблема районирования территорий по значению объёмов метелевого переноса снега.

Проблемы с терминологией. Следует отметить, что для русскоязычного сегмента отмечается существенное отставание в количестве исследований и уровне разработки вопросов снегопереноса от англоязычного сегмента, хотя почти весь XX век наблюдалось если не преобладание научных идей, опубликованных на русском языке, то точно паритет с англоязычным сегментом. Еще в 1977 г. английский исследователь снегопереноса Radok U. [34] написал работу на английском языке с попыткой проанализировать направление идей русскоязычных авторов и сопоставить с наработками англоязычных и считал сам факт некого обобщения опыта уже большой научной задачей. Это несмотря на то, что в период МГГ работы советских исследователей активно переводились для англоязычных учёных и наоборот, например в журнале Материалы гляциологических исследований.

Таблица 3. Сравнение основных терминов на двух языках по 7 критериям
Table 3. Comparison of main terms in two languages according to 7 criteria

Определения по источникам	Название явления на языке оригинала	Снег, лежащий на поверхности	Снег, ещё не коснувшийся поверхности	Указание на нижнюю границу	Указание на границу 1,8-2 м	Указание на верхнюю границу	Упоминается видимость	Указание на скорость ветра
Русскоязычный сегмент								
1-е определение [35]	Позёмок	+	-	-	+	-	-	-
2-е определение [2]		+	-	-	-	+ (0,1-0,2 м)	-	-
3-е определение[2]		+	-	+	-	+ (0,5 м)	-	-
4-е определение [4]		+	-	-	-	+ (0,5 м)	+	-
1-е определение [35]	Низовая метель	+	-	-	+	-	+	-
2-е определение [2]		+	-	+ (0,2)	-	-	-	-
3-е определение[2]		+	-	-	-	+	-	-
4-е определение [4]		+	-	-	+	-	+	+ 2
1-е определение [35]	Верховая метель	-	+	-	-	-	-	-
2-е определение [2]		-	+	-	-	-	-	-
3-е определение[2]		-	+	-	-	-	-	+
4-е определение [4]		-	+	-	-	-	+	-
Определения не отличаются	Общая метель	+	+	-	-	-	-	-
Англоязычный сегмент								
1-е определение[3]	Drifting snow	-	-	-	-	+ 3	+	-
2-е определение [4]		+	-	-	+	-	+	-
3-е определение[5]		+	+	-	-	-	-	+ 4
4-е определение [36]		-	-	-	+	-	+	-
5-е определение[6]		+	-	-	-	-	+	-
6-е определение[7]		+	-	-	+	-	+	-
7-е определение [37]						+ 3	+	
1-е определение [8]	Blowing snow	-	-	-	-	+ 5	+	-
2-е определение [4]		-	-	-	+	+ 6	+	-
3-е определение [5]		+	+	-	-	-	+	+ 4
4-е определение [36]		-	-	-	+	-	-	-
5-е определение [6]		+	-	-	+	-	-	-
6-е определение [37]		-	-	-	+	+ 6	+	-

1 – «непосредственно над»; 2 – «достаточной силы»; 3 – «small hight» [небольшая высота]; 4 – «strong winds» [сильные ветра]; 5 – «sufficient heights» [достаточная высота]; 6 – «moderate or great heights» [средние или сильные ветра]

В современных условиях подавляющее количество материала о снегопереносе публикуется именно на английском языке, и правильная трактовка терминов из этих работ является важной задачей для русскоговорящих исследователей.

2 ОДМ 218.2.045-2014. Рекомендации по проектированию лесных снегозадерживающих насаждений вдоль автомобильных дорог. ИЗДАН на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от «24» 12. 2014 г. № 2629-р.

3 Glossary // community.wmo.int. – URL: https://community.wmo.int/en/glossary (дата обращения: 30.04.2025)

4 Cryosphere glossary // nsidc.org. – URL: https://nsidc.org/learn/cryosphere-glossary (дата обращения: 30.04.2025)

5 National Weather Service Glossary // forecast.weather.gov. – URL: https://forecast.weather.gov/glossary.php (дата обращения:30.04.2025)

6 Glossary // climate.weather.gc.ca. – URL: https://climate.weather.gc.ca/glossary_e.html (дата обращения: 30.04.2025)

7 Glossary of Meteorology // www.ametsoc.org. – URL: https://www.ametsoc.org/ams/publications/glossary-of-meteorology/

8 Climate guidelines glossary // www.canada.ca. – URL: https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/preventive-conservation/climate-guidelines/climate-guidelines-glossary.html/ (дата обращения: 30.04.2025)

В таблице 3 разобраны различные определения 6 терминов, которые относятся к снегопереносу: 4 – используются в литературе на русском языке, 2 – на английском языке. Исходя из физического смысла процесса переноса снега ветром и с учётом частоты упоминания условий в самих определениях были выделены 7 критериев по которым сравнивались эти определения. «+» критерий упоминается в прямом смысле или косвенно, «-» – не упоминается. Дополнительная цифра у знака – особенность упоминания, указанная в сноске.

После анализа различных определений можно сделать следующие выводы: в терминах, использующихся в русскоязычном сегменте основной принцип, по которому названы явления – принцип касания/не касания частичек снега поверхности – по этому принципу не выявлены разночтения между терминами; в англоязычных терминах главный признак – видимость на уровне глаз наблюдателя – происходит ли перемещение снега выше уровня глаз или ниже. По многим другим признакам видны серьёзные разночтения, которые не дают однозначно провести знак равенства между определениями на разных языках.

В последних научных работах на английском языке исследователи всё чаще стали уходить от использования двух терминов *drifting snow* и *blowing snow* – весь снег, переносимый ветром над поверхностью, называется *blowing snow*, что является прямым аналогом – *общей метели*.

Термин *drifting snow* наиболее точно можно уровнять по смыслу с *позёмком*, ведь после МГГ в некоторых трудах определения этих терминов стали почти идентичны – процесс переноса ранее упавшего на поверхность снега до высоты 2 метра. Однако тот смысл, который изначально вкладывался в слово «позёмок», утерян, ведь ассоциировался позёмок именно с процессом сальтации, которая по мнению большинства учёных поднимается в среднем до высоты 0,2 метра над поверхностью. А английское слово *drifting* имеет значение «движется, обычно без контроля своего направления», т.е. схоже с понятием *позёмок*.

В итоге, можно заключить, что для терминов *низовая метель* и *верховая метель* в английском языке нет прямых аналогов и при переводе документов необходимо обращать внимание на контекст употребления иностранных терминов. Хотя в нескольких работах было использовано определение *windborn snow* (буквально «снег, рождённый ветром»), что может быть аналогом термина *низовая метель*.

Так же можно отметить несколько работ, например [38] в которой весь снег, переносимый ветром, называется *drifting snow.* Множество работ, написанных в XXI веке [13, 28, 39], в которых весь снегоперенос называется термином *a(eolian) transport – ветровой перенос снега,* по аналогии с термином, который используется в работах по переносу песка. История использования терминов из геоморфологии имеет сложную историю и для разбора всех аспектов этого вопроса, по мнению автора, нужно написать отдельную работу.

Видно, что такая неточность в основных формулировках связана со сложностью самого явления. Автор считает, что требуется доработка терминологического аппарата в направлении выработки единого международного подхода к описанию данных явлений, который опирается только на научное описание терминов.

Логика уравнивания по смыслу между собой терминов на разных языках следующая: необходимо уйти от визуального аспекта употребления терминов и сконцентрироваться на физическом. Главным критерием для определения низовой, верховой и общей метели предлагается считать перенос ветром уже коснувшегося поверхности снега или еще нет, вне зависимости от скорости ветра и видимости. В таком случае понятие «позёмок» предлагается в принципе убрать из обихода в снеговедении и включить его по смыслу в понятие «низовая метель». Для англоязычного сегмента введём специальный термин, который будет описывать «перенос снега, ещё не коснувшегося поверхности» и тогда, по мнению автора, терминологический аппарат на двух языках будет сбалансирован и такие изменения не потребуют каких-то серьёзных усилий для его освоения.

Автор предлагает следующие варианты определений:

низовая метель (drifting snow) – перенос ветровым потоком только что упавших или ранее отложенных частичек снега.

верховая метель (airborne snow) – перенос ветровым потоком только снега, который не коснулся поверхности. В англоязычной научной литературе данный термин (airborne snow) не используется, однако он по смыслу подходит к описываемому процессу.

общая метель (blowing snow) – перенос ветровым потоком снега обоих типов.

Проблемы с уровнем развития инструментальной базы и получение качественных полевых данных. Инструментальная база для исследований переноса снега – ключевой фактор в точных расчётах объёмов снегопереноса и сублимации. Без точных и долгосрочных данных невозможно настроить модели и дать достоверный прогноз объёмов снегопереноса, не говоря о прогнозировании самого факта наступления данного события.

Проведённый анализ работ в русскоязычном сегменте и личная практика автора указывают на то, что качественный и систематический сбор данных о переносе снега на территории нашей страны практически не ведётся, за редким исключением. Автором не были найдены цифровые или автоматические или новые механические метелемеры отечественной разработки, созданные в последние десятилетия. В англоязычном научном сегменте, несмотря на наличие современных приборов, можно встретить замечания [7] о качестве данных, которые поступают с автоматических приборов, измеряющие различные параметры снегопереноса.

Только в одном районе планеты (Альпийские горы) существуют многолетние непрерывные данные наблюдений, полученные с автоматических снежных станций, в то время как максимально продолжительный непрерывный ряд наблюдений в Антарктиде составляет 3 года [39].

Помимо продолжительности и непрерывности наблюдений большое значение имеет наличие сети автоматических метелемерных станций. В настоящее время самым насыщенным станциями регионом является также Альпийские горы. Автору не удалось найти упоминание о других крупных сетях автоматических снежных станций в других частях планеты.

В целом, вопрос инструментального обеспечения измерения параметров метелевого переноса снега, остаётся недостаточно проработанным. Необходимо создание более современных и объёмных измерительных приборов с развитием сети автоматических станций для качественного изучения законов и особенностей снегопереноса.

Проблемы качественного моделирования процесса снегопереноса. Проблемы моделирования метелевого переноса снега связаны с тем, что существующие климатические модели имеют низкое пространственное разрешение, что не позволяет точно отображать мелкомасштабные процессы в горных районах. Это приводит к неточностям в моделировании фазовых переходов осадков и других важных процессов.

Проблема доступа к научным данным. Проблемы с открытым доступов к данным актуальны для обоих научных сегментов. Основная проблема англоязычного сегмента – платные сервисы доступа к научным статьям, основная проблема в русскоязычном сегменте – отсутствие отсканированных работ в открытом доступе.

Оцифровка архивов – важный элемент в создании международного научного сообщества. К примеру, многие статьи, опубликованные в журналах Journal of Glaciology или Annals of Glaciology были оцифрованы и добавлены на сайты только в 2017 г., а в русскоязычном сегменте многие работы не оцифрованы вовсе, их можно получить в ограниченном количестве 10 страниц за один запрос) на платной основе в некоторых репозитариях (например, в Российской Государственной Библиотеке).

Проблема финансирования. Пожалуй, главная проблема. В некоторых работах говорится прямо о проблемах в финансировании крупных проектов по изучению снега и снегопереноса, в некоторых – косвенно.

Проблема нехватки специалистов. В мире и в России наблюдается нехватка специалистов, занимающихся изучением снегопереноса, которые могли бы с учетом последних научно-технических достижений уточнить разработанные ранее методики, либо создать новые, о чём можно косвенно судить по сокращению числа публикаций, посвященных этой теме. Интересный пример потери кадров был описан в работе [40]. Автор описывает сложность в понимании более молодыми работниками тех проблем в проектировании, которые уже были решены ранее: «Когда работники по техническому обслуживанию, которые помнят о первоначальной проблеме и ее решении, переезжают или уходят на пенсию, у тех, кто их заменяет, часто нет оснований для оценки эффективности существующих мер контроля» [перевод с английского]. Могу предположить, что подобная ситуация сложилась и в нашей стране после распада СССР.

Районирование территории. В данной работе никак не затронута тема районирования территории по уровню снегозаносимости дорожных магистралей или уровню годового объёма снегопереноса. Автором найдены единичные работы по созданию карт объёмов снегопереноса только в пределах бывшего СССР [41]. Подобных работ или карт по другим территориям и странам автором не было встречено. Следует отметить, что подобные карты важны для проектирования, строительства и обслуживания автомобильных и железных, а также для минимизации рисков, связанных со снегопереносом в отношении других инфраструктурных, промышленных объектов и населенных пунктов.

Если кратко подвести итоги изучения истории развития знания о метелевом переносе снега, то можно отметить, что для данного научного направления до сих пор не понятно место, которое данное направление должно занимать в иерархии наук, и конкретно к какой науке должно относиться. Среди наук, которые так или иначе изучают снегоперенос выделяются гидрология, метеорология, гляциология и снеговедение. Несмотря на попытку во времена МГГ выделить снеговедение отдельным направлением по изучению снега и связанных с ним процессов, до сих пор не разработан учебник ни на русском языке, ни на иностранных. Из-за разных целей изучения метелевого переноса снега до сих пор не выработаны единообразные определения для названия основных явлений и описания переменных.

В истории изучения снегопереноса однозначно была выделена только одна проблема, которая являлась причиной появления советской и австралийской школ – проблема верхней границы переноса снега, а именно, способность частичек снега витать высоко в воздухе в таком количестве, чтобы оказывать существенное влияние на объёмы переносы снега. Скорее всего этот вопрос был в некоторой степени решён в начале XXI века после опубликования спутниковых снимков с изображением огромного поля перенесённого снега с побережья Антарктиды. Хотя стоит отметить, что количество снега, которое подсчитали в работе [10] не превышает значения объёмов переноса снега, которые Дюнин А.К. обозначил в работе [15] как максимально возможное для лимитной теории.

Что отличается достаточно сильно от советской теории, так это высота, на которой обнаружен снег – она гораздо выше, чем 100 м, и выше, чем 300 м, про которые говорили сторонники диффузионной теории. Указывается, что снег в 0,8 % случаев переноса поднимается до высоты 1000 м. Конечно, точность изучения со спутника имеет существенную погрешность (более 30 м), однако даже с учётом такой погрешности высоты изменяться не существенно.

Скорее всего различие в двух школах не имеют серьёзной теоретической базы, а вызваны только различием в условиях изначального проведения наблюдений и неразвитостью инструментальной базы.

Практическое применение знаний о переносе снега повсеместно усовершенствует различные гидрологические, гляциологические и метеорологические модели, делая их более точными в построении прогнозов. Однако отсутствие крупных объёмов данных, о которых

упоминал ещё Дюнин А.К в середине XX века, особенно для такой страны как Россия, делает совершенствование подобных моделей до приемлемого уровня прогноза нереалистичным занятием. Различные ландшафты требуют детальной проработки специфичных для каждого вида ландшафта параметров снегопереноса и накопления долгосрочных массивов данных для построения точных локальных моделей.

Среди возможный путей решения некоторых обозначенных проблем можно выделить следующие: разработка мобильных автоматических станций с приборами объёмного или площадного сканирования снеговетрового потока с автоматическим подсчётом объёмов переноса снега; включение в систему стационарных метеорологических станций приборов для систематического сбора информации о фактических параметрах снегопереноса; адаптация терминологического аппарата под современный уровень развития науки и техники; разработка учебных пособий в рамках науки снеговедение о особенностях снегопереноса и продолжение разработки теоретической базы ландшафтного снеговедения.

Выводы

Анализ большого количества источников позволил выделить следующие проблемы, стоящие перед исследователями метелевого переноса снега:

1) проблемы модернизации основного терминологического аппарата;

2) проблема недостаточной развитости инструментов измерения и получения качественных полевых данных;

3) проблемы моделирования процесса снегопереноса и объединения с более масштабными моделями;

4) проблема доступа к научным данным;

5) сложность нахождения финансирования на крупномасштабное изучение процесса метелевого переноса снега;

6) проблема сохранения кадров;

7) создание карт районирования территорий.

Для решения некоторых из обозначенных проблем автором было предложено следующее: терминологический аппарат предложено дополнить новыми билингвальными парами терминов, увязанных между собой по смыслу; предлагается в обязательную программу метеорологических наблюдений на ГМС включить и метелемерные наблюдения с применением автоматизированных метелемеров; предлагается продолжить работу по развитию направления «Ландшафтное снеговедение», поскольку территория РФ, с одной стороны, характеризуется огромным разнообразием ландшафтов, а с другой – большей частью лежит в умеренных и субарктических широтах с длительным залеганием снежного покрова. О проблеме финансирования и кадровой проблеме автору сложно судить на своём уровне компетентности, однако очевидно, что перечисленные в работе проблемы связаны с немалыми финансовыми затратами как при подготовке кадров, так и для организации и работы научных лабораторий.

Благодарности

Представленные результаты получены в рамках государственного задания СКБ САМИ ДВО РАН (FWWW-2024-0003).

Acknowledgments

The paper includes the results obtained withing the framework of the research project FWWW–2024–0003 of the Special Research Bureau for Automation of Marine Research FEB RAS.

Литература / References

1. Дюнин А.К. Механика метелей. Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния АН СССР; 1963. 378 с.
2. Гляциологический словарь / Котляков В.М. и др., Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 528 с.
3. Рихтер Г.Д. Словарь терминов по снеговедению // Материалы гляциологических исследований: хроника обсуждений. 1965. №11. С. 198–247.

4. Хромов С.П. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 568 с.
5. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3. Часть 1. «Метеорологические наблюдения на станциях». Гидрометеоиздат, 1985 г.
6. Tabler D.T., Pomeroy J.W., Santana B.W. Drifting snow. Cold regions hydrology and hydraulics, 1990, pp. 95–145.
7. Aksamit N.O. Alpine turbulence and blowing snow. Dr. Sci. Saskatchewan, Canada, 2017. P. 178.
8. Amory C. Comparison between observed and simulated aeolian snow mass fluxes in Adélie Land, East Antarctica. The Cryosphere, 2015, no 9, pp. 1373–1383. DOI:10.5194/tc-9-1373-2015.
9. Budd W.F., Dingle W.R., Radok U. The Byrd snow drift project: outline and basic results // Studies in Antarctic Meteorology, 1966, vol. 9, pp. 71–134. DOI:10.1029/ar009p0071.
10. Satellite remote sensing of blowing snow properties over Antarctica. Palm S.P. et al. Journal of geophysical research, 2011, vol. 116, pp. 1–16. DOI: 10.1029/2011JD015828.
11. Pomeroy J.W., Gray D.M. Snowcover: Accumulation, Relocation, and Management. Saskatchewan, Canada, 1995, 135 p.
12. Kobayashi D. Studies of snow transport in low-level drifting snow. Contributions from the Institute of Low Temperature Science, A24, 1972, pp. 1–58.
13. Walter B., Weigel H., Wahl S., Löwe H. Wind tunnel experiments to quantify the effect of aeolian snow transport on the surface snow microstructure. The Cryosphere, 2024, vol. 18, pp. 3633–3652. DOI: 10.5194/tc-18-3633-2024.
14. Lundquist J.D., Vano J., Gutmann E., Hogan D., Schwat E., Haugeneder M., Mateo E., Oncley S., Roden C., Osenga E., Carver L. Sublimation of snow. Bulletin of the American Meteorological Society, 2024, vol. 105, pp. 975–990. DOI: 10.1175/BAMS-D-23-0191.1.
15. Дюнин А.К., Анфилофьев Б.А., Истрапилович М.Г., Квон Я., Мамаева Н.Т. Механика сильных метелей и особенности исследования метелевого режима в горах // Материалы гляциологических исследований: хроника обсуждений. 1976. №26. С. 165–171.
16. Schmidt R.A. Threshold wind-speeds and elastic impact in snow transport. Journal of Glaciology, 1980, vol. 26, no. 94, pp. 453–467.
17. Colbeck S.C. History of snow-cover research. Journal of Glaciology, 1987, vol. 33, no. S1, pp. 60–65. DOI:10.3189/s0022143000215839.
18. Gallée, H., Trouvilliez A., C. Agosta, C. Genthon, V. Favier, F. Naaim-Bouvet. Transport of Snow by the Wind: A Comparison Between Observations in Adélie Land, Antarctica, and Simulations Made with the Regional Climate Model MAR. Boundary-Layer Meteorology, 2013, no. 146, pp. 133–147. DOI:10.1007/s10546-012-9764-z.
19. Lenaerts J.T., Broeke M.V., Déry S.J., Meijgaard E.V., Berg W.J., Palm S.P., Rodrigo J.S. Modeling drifting snow in Antarctica with a regional climate model: 1. Methods and model evaluation. Journal of geophysical research, 2012, Vol. 117, pp. 1–17. DOI:10.1029/2011JD016145.
20. Кузнецов В. Об измерениях количества снега, переносимого ветром по горизонтальному направлению // Метеорологический вестник ИРГО. 1900. Т. 10. С. 477–481.
21. Landon Smith I.H., Woodberry B. The photoelectric metering of wind-blown snow. A new photoelectric drift snow gauge. Ed. by E.R. Wishart, Melbourne, 1965, 26 p.
22. Lehning M., Naaim F., Naaim M., Brabec B., Doorschot J., Durand Y., Guyomarc'h G., Michaux J., Zimmerli M. Snow drift: acoustic sensors for avalanche warning and research. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2002, vol. 2, pp.121–128. DOI:10.5194/NHESS-2-121-2002.

23. Ito Y., Naaim-Bouvet F., Nishimura K., Bellot H., Thibert E., Ravanat X., Fontaine F. Measurement of snow particle size and velocity in avalanche powder clouds. Journal of Glaciology, 2017, no. 63, pp. 249–257. DOI:10.1017/jog.2016.130.
24. Taylor P., Gordon M., Savelyev S., Biswas S., Albarran-Melzer M. Field studies of drifting and blowing snow, 2008.
25. Wood L.E. Automatic weather stations. Journal of meteorology, 1946, vol. 3, pp. 115–121.
26. Ахмерова А.Н. Гайнуллина А.А. Сравнительный обзор методов реализации цифровой трассерной визуализации // Вестник технологического университета. 2016. Т.19. №17. С. 115–117.
27. Знаменская И.А. Методы панорамной визуализации и цифрового анализа теплофизических полей. Обзор // Научная визуализация. 2021. Т. 13. № 3. С. 125–158. DOI: 10.26583/sv.13.3.13.
Znamenskaya I.A. Methods for Panoramic Visualization and Digital Analysis of Thermophysical Flow Fields. A Review. Scientific Visualization, 2021, vol. 13, no. 3, pp.125–158. DOI: 10.26583/sv.13.3.13. (In Russian, abstract in English).
28. Crivelli P. Interactions between drifting snow and surface dynamics. Lausanne, Switzerland. 2018, 110 p. DOI:10.5075/EPFL-THESIS-8513.
29. Essery R., Morin S., Lejeune Y., Menard C.B. A comparison of 1701 snow models using observations from an alpine site. Advances in Water Resources, 2012, no. 55, pp. 131–148. DOI:10.1016/j.advwatres.2012.07.013.
30. Huang N. Wang Z. A 3D-simulation of drifting snow in the turbulent boundary layer. The Cryosphere Discuss, 2015, no. 9, pp. 301–331. DOI:10.5194/tcd-9-301-2015.
31. Podolskiy E.A., Chambon G., Naaim M., Gaume J. A review of finite-element modelling in snow mechanics. Journal of Glaciology, 2013, no. 59, pp. 1189–1201. DOI:10.3189/2013JOG13J121.
32. Meshkova V.D. et al. SigmaFlow CFD code as a tool for predicting the wind environment around a group of buildings. Journal of Physics: Conference Series, 2020, no. 1675, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/1675/1/012119.
33. Wang F, Wang X, Li S Explainable machine learning for predictive modeling of blowing snow detection and meteorological feature assessment using XGBoost-SHAP, 2025, PLoS ONE 20(3): e0318835.
34. Radok U. Snow drift. Journal of Glaciology, 1977, vol. 19, no. 81, pp. 123–139. DOI: 10.3189/S0022143000215591.
35. Ледоведение и ледотехника / Песчанский И.С., Л.: Гидрометеоиздат, 1967, с. 461.
36. Cogley J.G., Hock R., Rasmussen L.A., Arendt A.A., Bauder A., Braithwaite R.J., Jansson P., Kaser G., Möller M., Nicholson L., Zemp M. Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms, IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2, UNESCO-IHP, Paris, 2011.
37. Armstrong T. Illustrated Glossary of Snow and Ice, Scott Polar Research Institute, 1973, 116 p.
38. Lenaerts J.T.M. Modeling drifting snow in Antarctica with a regional climate model: 2. Results. Journal of geophysical research, 2012, vol. 117, D05109, DOI:10.1029/2010JD015419.
39. Blowing snow in Antarctica: 3 years of continuous observations in Adelie Land. Trouvilliez A. et al. International Snow Science Workshop Grenoble, 2013, pp. 1327–1331.
40. Tabler R.D. Design Guidelines for the Control of Blowing and Drifting Snow, 1994, p.364.
41. Переносы снега при метелях и снегопады на территории СССР / Михель В.М., Руднева А.В., Липовская В.И., Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 203 с.

Поступила в редакцию / Received 20.02.2025
Принята к публикации / Accepted 18.03.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сергеев Михаил Сергеевич, аспирант, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, младший научный сотрудник, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия, SPIN-код: 3186-5604, https://orcid.org/0009-0009-5473-4644, e-mail: sergeevsnow@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Mikhail S. Sergeev, PhD student, The Institute of marine Geology and Geophysics of the far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, junior researcher, Special Research Bureau for Automation of Marine Researches of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, SPIN-code: 3186-5604, https://orcid.org/0009-0009-5473-4644, e-mail: sergeevsnow@mail.ru