

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата географических наук Дроздова Евгения Дмитриевича
на тему: «Моделирование снежного покрова на горных ледниках»
по специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате

Диссертационная работа Е.Д. Дроздова посвящена созданию модели снежного покрова промежуточной сложности для применения в глобальных гляциологических моделях при прогнозе горного оледенения. Актуальность данной работы не вызывает сомнений. Горные ледники являются важнейшим индикатором климатических изменений и критическим источником пресной воды для многих регионов мира. При этом снежный покров горных ледников имеет особую специфику, связанную с метелевым переносом, сублимацией ледяных кристаллов и взаимодействием с подстилающей поверхностью, что требует специальных подходов к моделированию. Существующие модели снежного покрова, как правило, ориентированы на равнинные территории умеренных и высоких широт, а их применение в горных условиях имеет ряд ограничений. Поэтому разработанная автором модель снежного покрова для горных ледников, способная работать в составе гляциологической модели IGRICE, представляет собой актуальную и практически значимую задачу.

В **первой главе** диссертации представлен развернутый аналитический обзор существующих подходов к моделированию снежного покрова и баланса массы ледников. Диссертант демонстрирует глубокое понимание предметной области, глубоко рассматривая три основных класса моделей снежного покрова (упрощенные, промежуточной сложности и детальные) с разбором их физических основ, преимуществ и ограничений. На основе этого анализа автор приходит к обоснованному выводу о целесообразности создания новой модели снежного покрова промежуточной сложности. При этом четко указано, какие процессы должны быть учтены в такой модели в первую очередь: ветровое уплотнение снега, метелевая сублимация, проникновение солнечной радиации в снежную толщу и замерзание жидкой

влаги. Этот вывод ложится в основу первого защищаемого положения диссертации.

Достоверность выводов первой главы обеспечивается ссылками на обширный массив литературных источников. Однако если рассмотреть картину в целом, ряд фундаментальных работ отечественных ученых по теме диссертации не представлен или упоминается фрагментарно. Например, не представлены работы В.М. Котлякова, А.Д. Голубева, А.Н. Кренке и др., хотя они имеют прямое отношение к теме снежного покрова в горах, их динамике и опасным явлениям. Также является упущением присутствие единственной ссылки на работы С.А. Сократова. Его работы по теплопроводности снега, включая влияние температурного градиента на метаморфизм, напрямую связаны с численным решением уравнения теплопроводности, которое является основой модели SnowDraw. Насколько мне известно, С.А. Сократов публиковал работы по сублимации снега, по вопросам упрощения физики снега в моделях. Думаю, что его результаты могли бы быть использованы для сравнения или верификации.

Вторая глава диссертации посвящена организации и результатам полевых наблюдений на леднике Гарабаши и на скалах Пастухова. Глубоко анализируются процессы, формирующие снежный покров в высокогорных условиях. Автор провел масштабные натурные измерения, создав уникальную базу для верификации разрабатываемой модели. Детально описываются приборная база и методики измерений с исчерпывающими сведениями об акустических анемометрах, метелемерах, термокосах, погрешностях измерений и дискретности данных. Особо следует отметить, что при участии автора организованы и выполнены многомесячные автоматические измерения интенсивности метелевого переноса в зоне аккумуляции горного ледника на высоте 4720 м. Эти данные, несомненно, имеют высокую научную ценность и позволяют количественно оценить вклад метелевых процессов в баланс массы ледника. Впервые автором проведено сопоставление данных реанализа ERA-5 с уникальными наблюдениями в зоне аккумуляции и показано, что ERA-5 удовлетворительно воспроизводит температуру воздуха

и влажность, но существенно занижает экстремальные скорости ветра и интенсивность метелевого переноса.

В качестве замечаний можно отметить, что в данной главе содержится очень детальное описание каждого прибора с указанием его производителя и даже ссылками на сайты производителей. Это, безусловно, полезно для полноты картины, но занимает непропорционально много места. На мой взгляд, детальную техническую информацию и некоторые таблицы (например, таблицу 2.2.2, где перечислены все приборы с погрешностями) можно было бы вынести в приложение или сократить.

Третья глава является центральной в данной работе и содержит описание разработанной автором модели снежного покрова промежуточной сложности, предназначенной для применения в гляциологических задачах, в первую очередь в составе глобальной гляциологической модели IGRICE. Глава включает описание методов подготовки входных данных, общую структуру модели, численных методов, параметризаций тепловых, радиационных и водно-балансовых процессов. Соискатель демонстрирует глубокое понимание физических процессов, определяющих формирование и динамику снежного покрова. Разработанная модель представляет собой законченную, работоспособную схему, которая обладает рядом существенных достоинств. Обращает на себя внимание факт, что код модели написан на языке Fortran 90 с четким разделением на модули, обеспечивая гибкость и возможность интеграции в другие модели. Предусмотрены различные варианты входных сеточных и станционных данных.

В главе присутствует некорректная нумерация, после параграфа 3.7 следует параграф 4.3 «Методы расчета количества осадков и приходящей солнечной радиации...». Очевидно это опечатка, и данный параграф должен иметь номер 3.8. К сожалению, по тексту диссертации встречается большое количество ошибок редакционного характера.

В четвертой главе автор представляет результаты всесторонней верификации разработанной модели SnowDraw с контрольными данными различного уровня, включая уникальные собственные измерения на леднике

Гарабаши и многомесячные стационарные наблюдения. Показано, что SnowDraw воспроизводит сход снега с ошибкой в среднем около 12 дней, в то время как Noah-MP ошибается на месяц и более. Однако в зоне аккумуляции (выше 4100 м) модель не воспроизводит полного схода снега, что автор связывает с недоучетом прогрева поверхности в данных реанализа ERA-5 на этих высотах. Проведенные автором эксперименты по чувствительности продемонстрировали эффективность разработанных специализированных «горных» параметризаций. Для оценки времени схода снега на разных высотах в работе используются спутниковые данные Sentinel-2. Результаты разработанной модели SnowDraw сопоставляются с моделями SNOWPACK, Noah-MP, SPONSOR, а также с ансамблем из 26 мировых моделей, участвовавших в проекте SnowMIP. Показано, что SnowDraw находится на хорошем уровне, RMSE варьируется в диапазоне 0.41 до 0.60 против средних 0.4–1 для ансамбля моделей SnowMIP. Оценка вычислительной эффективности указывает на практическую значимость модели для климатических прогнозов. Автор честно указывает, что модель тестировалась на полигонах с почвенной подстилающей поверхностью, для чего пришлось вносить упрощения.

Автором показано, что модель SnowDraw хорошо воспроизводит высоту и водный эквивалент снега, но слабо – альбедо. Планируется ли совершенствование параметризации альбедо и какие подходы для этого предполагается использовать?

В **пятой главе** автор обосновывает практическую значимость модели SnowDraw, приводятся конкретные примеры 42-летней реконструкции динамики снежного покрова на леднике Гарабаши, пространственное картирование снежного покрова на всем оледенении Эльбруса и тестирование модели в других горно-ледниковых районах. Глава также содержит анализ применимости реанализа ERA-5 для гляциологических расчетов.

При тестировании на Шницбергене автор использовал те же параметры модели, что и для Кавказа. Однако физические свойства снега

(более высокая плотность из-за ветрового уплотнения, влияние морских аэрозолей на альбедо и др.) в прибрежных арктических условиях могут существенно отличаться. Следовало бы обсудить, насколько оправдано использование одних и тех же параметров и не требуется ли калибровка для разных регионов?

При моделировании на 42-летнем периоде используется упрощенный алгоритм «сброса» снега при превышении высоты 6 м. Как это упрощение может повлиять на оценки долгосрочной динамики ледника, особенно в условиях изменения климата?

Шестая глава посвящена исследованию физического механизма и количественной значимости метелевой сублимации для теплового и водного баланса снежного покрова на горных ледниках. Автор использует уникальные данные измерений метелевого переноса, полученные в ходе экспедиций 2020 и 2022 гг. на леднике Гарабаши для количественной оценки затрат тепла на сублимацию ледяных кристаллов. Рассматривается влияние сублимации на трех уровнях: тепловой баланс, температура снежной толщи, водный баланс. Показано, что высокие скорости ветра являются необходимой, но не достаточной причиной значительных потерь тепла. Ключевую роль играет дефицит влажности. Проведен эксперимент по сравнению результатов модели с включенным и отключенным блоком сублимации. Это позволило показать, что сублимация перестраивает структуру турбулентных потоков, особенно потока явного тепла. Оценки для всего оледенения Эльбруса позволяют понять, в каких высотных зонах сублимация значима, а в каких нет. Эти результаты впервые для Кавказа дают количественные оценки роли метелевой сублимации в балансе массы снежного покрова и показывают, что учет этого процесса необходим для корректного моделирования аккумуляции в высокогорных зонах.

В главе 2 автор отмечал, что акустический метелемер Flow Capt имеет тенденцию к завышению экстремальных значений. В главе 6 при расчетах сублимации используются данные этого прибора, но не обсуждается, как погрешность измерений влияет на оценки затрат тепла

и массы сублимирующих кристаллов. Следовало бы провести анализ чувствительности или хотя бы дать оценку неопределенности результатов.

В параграфе 6.1 автор вводит допущение, что при интенсивных метелях тепловой баланс поверхности обнуляется, а температура поверхности принимается равной температуре воздуха. Насколько такое допущение обосновано для Кавказа, где метели часто сопровождаются феновыми эффектами? Как показано на рис. 2.4.1, температура воздуха возросла на 10°C за 6 часов. В таких условиях изотермичность метелевого слоя может нарушаться.

В Заключение диссертант лаконично и структурированно подводит итоги проведенного исследования. Четко формулируются основные научные результаты, которые соответствуют содержанию глав диссертации и выносимым на защиту положениям.

Основные результаты диссертации представлены в 8 научных работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ, а также в многочисленных докладах на международных и всероссийских конференциях.

Диссертационная работа представляет собой самостоятельное и оригинальное научное исследование, выполненное на высоком научном, методическом и теоретическом уровне. Автор продемонстрировал способность организовать и провести сложные полевые исследования в экстремальных условиях высокогорья, разработать и реализовать физически обоснованную модель снежного покрова промежуточной сложности, провести всестороннюю верификацию модели на обширном наборе данных, включая международные полигоны, собственные измерения и спутниковую информацию, и применить модель для решения реальных гляциоклиматических задач. Работа вносит существенный вклад в развитие методов моделирования снежного покрова в гляциоклиматологии и имеет как научное, так и практическое значение.

Указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам

подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате (по географическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Дроздов Евгений Дмитриевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата географических наук по специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате.

Официальный оппонент:

доктор географических наук,
заместитель директора
ФГБУ «Гидрометеорологический
научно-исследовательский центр
Российской Федерации»

ХАН Валентина Моисеевна _____

«20» августа 2026 г.

Контактные данные:

Тел.: +(499)795-21-96, e-mail: khan@mecon.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация: 25.00.30. Метеорология, климатология, агрометеорология

Адрес места работы:

123376, г. Москва, Бол. Предтеченский пер., д. 13, стр. 1,
ФГБУ «Гидрометцентр России»

Тел.: +7(499)252-34-48, e-mail: hmc@mecon.ru

Подпись сотрудника ФГБУ «Гидрометцентр России» В.М. Хан удостоверяю: