

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи



Комаров Антон Юрьевич

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СНЕЖНОГО
ПОКРОВА В МОСКОВСКОМ РЕГИОНЕ

1.6.8 Гляциология и криология Земли
(25.00.31 Гляциология и криология Земли)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Научно-исследовательской лаборатории снежных лавин и селей географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** – *Сократов Сергей Альфредович — PhD, кандидат географических наук, доцент кафедры криолитологии и гляциологии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова*
- Официальные оппоненты** – *Васильчук Алла Константиновна — доктор географических наук, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории геоэкологии Севера географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова*
- Мачерет Юрий Яковлевич — доктор географических наук, ведущий научный сотрудник отдела гляциологии Института географии РАН*
- Розинкина Инна Адольфовна — кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией численных прогнозов погоды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации.*

Защита диссертации состоится 29 сентября 2022 г. в 18-00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.4 (МГУ.11.04) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, Географический факультет, 21 этаж, ауд. 2109.

E-mail: dissovet.geogr.msu@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/459122425/>

Автореферат разослан 24 мая 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МГУ.016.4 (МГУ.11.04),
кандидат географических наук



Е.Ю. Матлахова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Благодаря своим физическим свойствам, особенностям строения и пространственного залегания сезонный снежный покров является важной составляющей природных систем умеренных, субполярных и полярных широт (Рихтер, 1955). Следствием высоких значений альbedo снежного покрова является отражение значительной части приходящей солнечной радиации от его поверхности (Cox et al., 1999). Ввиду значительной пористости и, как следствие, низкой теплопроводности снежный покров определяет температурный режим, сроки и глубину промерзания почв и грунтов, которые учитываются при строительстве и эксплуатации объектов инфраструктуры (Котляков, 1961; Павлов, 1976). От толщины, плотности и микроструктуры слоёв снега зависит количество и интенсивность поступления воды в водосборы во время снеготаяния и, следовательно, наполняемость водохранилищ, увлажнённость почв и состояние грунтовых вод, что находит применение в сельском хозяйстве и электроэнергетике (Кузьмин, 1957; Lehning et al., 2002). Строение снежного покрова определяет устойчивость снега на склонах (Тушинский, 1949; Brun et al., 1989) и условия существования флоры и фауны под снегом (Формозов, 1990). Значительные механические нагрузки, связанные с залеганием снежного покрова, также оказывают влияние на функционирование природных систем и хозяйственную деятельность (Войтковский, 1977).

Большая межгодовая и сезонная изменчивость в площади распространения, продолжительности залегания, свойствах и строении снежного покрова и наблюдаемые изменения зимних погодных условий определяют необходимость мониторинга и прогноза соответствующих показателей для принятия мер по защите от его неблагоприятного воздействия и рационального использования (Коломыц, 1976; Sturm, 1992; Rasmus et al., 2011). Существует необходимость параметризации снежного покрова в глобальных климатических моделях с учетом неоднородности его залегания, строения и определяемых ими теплофизических свойств (De Quervain, 1973; Bartelt et al., 2004). Современные методы дистанционного зондирования снежного покрова позволяют добиваться высокого пространственного разрешения получаемых данных о высоте снежного покрова, однако возможности автоматического определения строения и плотности снежной толщи остаются ограниченными (Pirazzini et al., 2018). Поэтому натурные исследования строения снежной толщи сохраняют свою актуальность.

Цель исследования заключается в оценке изменчивости строения и свойств снежного покрова в Московском регионе в зависимости от погодных условий, растительности и микрорельефа поверхности.

Основные задачи:

- 1) анализ данных метеорологических измерений на станциях Московского региона за период с 1960 по 2021 гг.
- 2) анализ данных натурных измерений параметров снежного покрова в шурфах и траншеях (зимы 2014–2021 гг.) и сравнение полученных результатов с данными литературных источников (зимы 1957/58 и 1961/62 гг.).

- 3) оценка возможностей восстановления и прогноза строения снежной толщи на основе среднесуточных значений метеорологических параметров;
- 4) выявление различий в строении снежной толщи, связанных с особенностями растительного покрова и микрорельефа поверхности;
- 5) оценка возможностей оперативного получения информации о снежном покрове с использованием методов дистанционного зондирования.

Объектом исследования диссертационной работы является снежный покров в Московском регионе, который включает территорию Москвы, Московской области и прилегающих областей в радиусе 150 км от центра Москвы. **Предметом** исследования является пространственно-временная изменчивость строения и свойств снежного покрова на исследуемой территории в зависимости от зимних погодных условий, растительного покрова и микрорельефа поверхности, представленного биогенными формами с амплитудой высот до десятков сантиметров.

Фактический материал, личный вклад автора. В основу диссертации положены результаты снегомерных работ, выполненных в Москве и Подмосковье в период с 2014 по 2021 гг. Фактический материал представлен данными снегомерных маршрутов и стратиграфическими описаниями снежной толщи в более чем 300 шурфах и траншеях, записями автоматических регистраторов высоты снежного покрова и камер с интервальным режимом съемки, данными дистанционного зондирования (ДДЗ) с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), данными метеорологических наблюдений на метеостанциях Москвы и Подмосковья и литературных источников (*Власов, 1914; Павлов, 1976; Формозов, 1990; Локощенко, 2005; Чернов, 2013 и другие*). Автор принимал активное участие в постановке задач, выполнении полевых работ и камеральных расчетов, интерпретации их результатов, подготовке материалов публикаций и докладов на конференциях. В работе приведены полученные автором результаты анализа многолетних рядов данных метеостанций Московского региона и описания более чем 300 шурфов и траншей. Разработка методики восстановления строения снежного покрова на основе данных стандартных метеорологических наблюдений выполнена автором под руководством доктора наук М. Стурма (University of Alaska, Fairbanks) в рамках научной стажировки Fulbright, которая проходила в г. Фэрбанкс, Аляска.

Методология. Для решения поставленных задач выполнялся сбор и обобщение литературных данных, применялись методы полевых исследований, которые включали снегомерные съемки и структурно-стратиграфические описания снежной толщи. Последующий камеральный анализ полученных данных выполнялся с использованием методов сравнения, статистического анализа, математического моделирования и дешифрирования данных дистанционного зондирования (аэрофотосъемка с БПЛА).

Основные защищаемые положения:

1. Регистрируемый с середины XX века рост средней зимней температуры воздуха и количества жидких осадков, выпадающих в зимние месяцы, приводит к сокращению продолжительности залегания, но не влияет на значения максимальной высоты снежного

покрова в Московском регионе. Сокращение продолжительности залегания устойчивого снежного покрова происходит преимущественно за счет смещения дат его установления на более поздний срок.

2. Межгодовая изменчивость продолжительности залегания, дат установления, разрушения и максимальной высоты снежного покрова в Московском регионе за тот же период времени увеличивается.

3. Результаты применения разработанного алгоритма, позволяющего восстанавливать строение снежной толщи на основе анализа среднесуточных значений метеорологических параметров, свидетельствуют об увеличении доли слоев таяния-замерзания в снежном покрове в Московском регионе в начале XXI века по сравнению с серединой XX века.

4. Высота снежного покрова, запасы воды в снеге и пространственная однородность исследуемых параметров снежного покрова в Московском регионе в лесных природно-территориальных комплексах (ПТК) меньше, чем в безлесных ПТК. Неоднородность снежного покрова в лесных ПТК обусловлена преимущественно влиянием стволов и крон деревьев, в то время как в безлесных ПТК она связана преимущественно с влиянием микрорельефа поверхности и ветровым воздействием.

Научная новизна работы. В результате полевых измерений получены и обобщены данные о строении снежного покрова рассматриваемого региона и впервые представлены схемы изменения строения снежной толщи зимами, характеризующимися значительно различающимися погодными условиями. Впервые выполнено сравнение стратиграфических разрезов снежной толщи исследуемой территории, описанных в соответствии с различающимися классификациями снега, и приведение их к единым классам для возможности сопоставления. Впервые дана оценка влияния изменяющихся погодных условий, растительности и микрорельефа поверхности на неоднородность строения и свойств снежной толщи на северо-востоке Московского региона. Разработана методика восстановления и прогноза строения снежной толщи на основе данных стандартных метеорологических наблюдений. Впервые на исследуемой территории произведена оценка возможностей определения высоты снежной толщи методами дистанционного зондирования с применением БПЛА. Впервые на данной территории произведены измерения твердости снега с использованием прибора SnowMicroPen.

Степень достоверности. Полученные данные о строении снежной толщи Московского региона и его пространственно-временной изменчивости хорошо согласуются с результатами исследований отечественных и зарубежных исследователей, выполненных в других регионах с аналогичными и похожими климатическими условиями. Проверка достоверности полученных результатов неоднократно осуществлялась на специализированных семинарах и конференциях, в опубликованных статьях, а высокая степень достоверности выводов обеспечена обширным фактическим материалом.

Теоретическая и практическая значимость работы. Использование информации о строении снежного покрова и понимание особенностей его залегания и свойств в Московском регионе дает возможность совершенствовать методы моделирования

природных процессов и оценки рисков опасных и неблагоприятных процессов, связанных со снежным покровом, на исследуемой территории и территориях со схожими условиями снегонакопления и метаморфизма снежной толщи. Установленные закономерности пространственного залегания снежного покрова и отдельных его слоев создают основу для гидрологических, метеорологических и климатических прогнозов, инженерного проектирования объектов инфраструктуры, включая оценку устойчивости фундамента, инженерных коммуникаций и несущих конструкций сооружений. Информация о пространственно-временной изменчивости снежного покрова даёт возможность рассчитывать и прогнозировать снеговые нагрузки, запасы воды в снеге и интенсивность весеннего снеготаяния, температурный режим и глубину промерзания грунта, интенсивность энергетического обмена между атмосферой и почвой на территориях, характеризующимся аналогичными району исследования рельефом, климатом и зимними погодными условиями.

Апробация. Результаты работы представлены на 19 тематических всероссийских и международных конференциях в форме 26 устных и 9 стендовых докладов: IV Международная конференция «Лавины и смежные вопросы» (Кировск, 2011); II Международный симпозиум «Физика, химия и механика снега» (Южно–Сахалинск, 2013); XIII научно-практическая конференция «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций» (Москва, 2014); XVI Гляциологический симпозиум «Прошлое, настоящее и будущее криосферы Земли» (Санкт-Петербург, 2016); EGU General Assembly 2017 (Вена, 2017); Первая научно-практическая конференция и выставка «Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг» (Москва, 2017); III Международный симпозиум «Физика, химия и механика снега» (Южно–Сахалинск, 2017); Семинар по численному моделированию лавин, оползней и горных обвалов в программе RAMMS (Ташкент, 2018); Междисциплинарные научные исследования в целях освоения горных и арктических территорий (Сочи, 2018); International Snow Science Workshop (Инсбрук, 2018); XV Общероссийская научно-практическая конференция «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 2019); Национальная картографическая конференция (Москва, 2018); EGU General Assembly 2019 (Вена, 2019); Fulbright IE Pre-academic program final poster conference (Сиракьюз, 2019); Международная конференция «Solving the puzzles from Cryosphere» (Пушино, 2019), Ломоносовские чтения 2019, секция «География» (Москва, 2019); XVII гляциологический симпозиум «Роль криосферы в прошлом, настоящем и будущем Земли» (Санкт-Петербург, 2020); UK-Russia Arctic Science Priorities Conference 2021 (Онлайн, 2021); Fulbright International Arctic Seminar (Онлайн, 2021).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 23 научных работы, в том числе 5 статей в рецензируемых изданиях из списка Scopus, WoS и RSCI (2 статьи в зарубежных журналах), 5 коллективных монографий, 11 статей в материалах всероссийских и международных конференций, 2 – в прочих изданиях. Постановка научных задач, проведение полевых и лабораторных исследований, анализ и интерпретация полученных результатов, предоставление их в печать осуществлялись непосредственно соискателем, либо при его активном участии. Во всех опубликованных работах вклад автора является

определяющим. Получение и дешифрирование ДДЗ осуществлялось под руководством А.А. Сучилина и А.Л. Энтина. В публикациях [3-10; 14; 19] вклад автора составляет 1/3, в публикациях [11-13; 15-18; 20-21; 23] – 1/4, в публикации [22] – 1/6.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 5 приложений. Общий объем работы составляет 198 страниц текста (с приложениями), включающего 60 рисунков и 23 таблицы. Список литературы состоит из 174 наименования, в том числе 80 на иностранных языках.

Благодарности. Диссертационная работа выполнена в Лаборатории снежных лавин и селей МГУ имени М.В. Ломоносова под руководством PhD, к.г.н. С.А. Сократова. Автор выражает благодарность научному руководителю диссертации С.А. Сократову, а также Ю.Г. Селиверстову, к.г.н. Т.Г. Глазковой и к.г.н. А.С. Турчаниновой за многочисленные рекомендации и советы при подготовке работы, А.А. Сучилину и к.г.н. А.Л. Энтину за помощь в организации измерений с использованием методов дистанционного зондирования, Д.М. Фролову за помощь в выполнении полевых работ. Автор признателен Н.А. Терешенку (Центральное УГМС), к.г.н. М.А. Локощенко (Обсерватория МГУ) и Н.Н. Коршуновой (ВНИИГМИ-МЦД) за предоставленные данные метеорологических измерений на станциях и постах. Благодарность за помощь в поиске данных и организации исследований автор выражает д.г.н. Н.А. Зайцевой (РАН), к.г.н. А.Л. Шныпаркову и всему коллективу НИЛ Снежных лавин и селей. Особую благодарность за возможность прохождения научной стажировки Fulbright автор выражает профессору Университета Аляски, Фэрбанкс М. Стурму.

СОДЕРЖАНИЕ

Во *введении* обоснована актуальность исследований строения и свойств снежного покрова, сформулированы основные цели и задачи диссертационного исследования, научная новизна работы.

Глава 1. Изученность снежного покрова

В главе 1 дан анализ существующих подходов и методов изучения ключевых характеристик снежного покрова, к которым относятся высота, плотность, запас воды и строение снежной толщи, то есть параметров, необходимых для оценки устойчивости снега на склонах, определения теплофизических свойств снега и гидрологических прогнозов. Рассмотрена история развития снеговедения. Выделены основные этапы развития снеговедения, для каждого из которых характерно появление новых задач, методов и подходов к изучению снега и снежного покрова.

Выполнен сравнительный анализ физико-механических (*Bader et al., 1939; Тушинский, 1953; Коломыц, 1976*) и климатических (*Pухтер, 1945; Sturm et al., 1995*) классификаций сезонно-выпадающего снега и формирующегося снежного покрова, наиболее часто применяемых на практике. Установлено, что сравнение классификаций возможно путем обобщения представленных типов снега и приведения их к единым классам. Предложена методика приведения классификаций к общим показателям, которая заключается в приведении всех представленных типов снега к трём классам, в наибольшей

степени различающихся по своим свойствам: слоев свежеснегавпавшего снега, слоёв с огранкой и слоёв таяния-замерзания.

Рассмотрены современные проблемы исследований строения снежного покрова, важнейшей из которых является количественная оценка его свойств и строения в различных пространственно-временных масштабах. Дан анализ возможностей и ограничений современных методов исследования снежного покрова, к которым относятся математическое моделирование строения и свойств снежного покрова на основе данных метеорологических измерений, дистанционного зондирования Земли с использованием спутниковых данных и беспилотных летательных аппаратов, методы автоматического получения информации о строении снежной толщи с использованием специальных высокотехнологичных приборов. Погрешности, связанные с разрешением получаемых результатов, обуславливают необходимость включения информации о пространственно-временной изменчивости снежного покрова в модели и её учета при дешифрировании данных дистанционного зондирования.

Глава 2. Снежный покров в Московском регионе

В главе 2 приведена характеристика условий снегонакопления и метаморфизма снежной толщи в Московском регионе. Дана краткая физико-географическая характеристика района исследования, характеристика растительности, геоморфологических и климатических условий Московского региона.

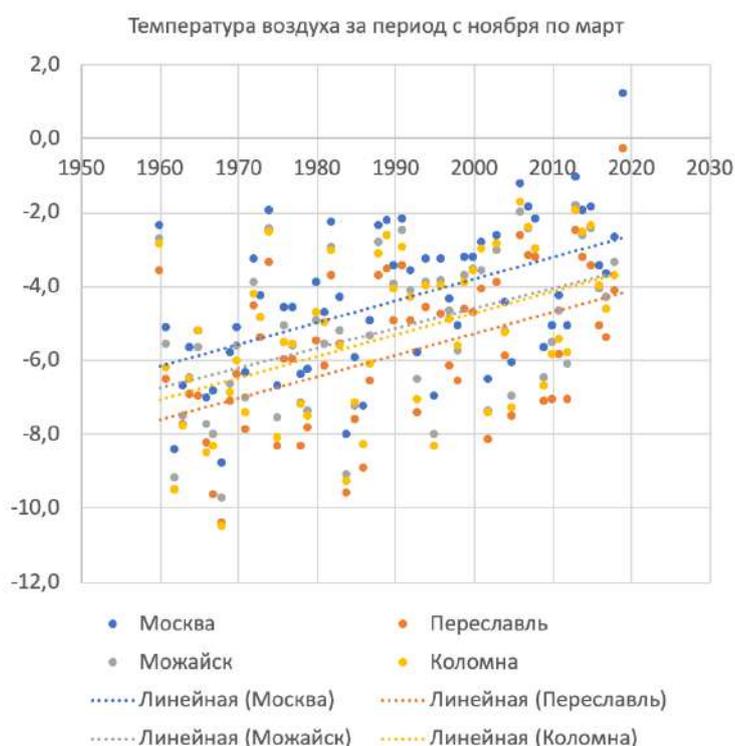
Исследуемая территория располагается в центральной части Восточно-Европейской равнины, что во многом определяет особенности рельефа, погодных условий и растительного покрова, то есть факторов, оказывающих влияние на строение и свойства снежного покрова. Согласно классификации Б.П. Алисова (*Алисов, 1957*), район исследования относится к территории с умеренно континентальным климатом, который характеризуется четко выраженной сезонностью, умеренно влажным теплым летом и умеренно холодной снежной зимой. В зимний период проникновение циклонов с юга и запада приводит к сильным и продолжительным снегопадам и оттепелям. С приходом сухих и холодных воздушных масс из Арктики и континентальной части России вследствие развития антициклонов наступают сильные морозы, во время которых температура воздуха может опускаться ниже -30°C . В связи со значительной изменчивостью атмосферной циркуляции часто наблюдает резкая смена погоды, большая межгодовая и сезонная изменчивость значений метеорологических параметров. При этом, пространственные различия в температуре воздуха и количестве осадков, выпадающих на метеостанциях, расположенных в пределах исследуемой территории, незначительны.

Рельеф Московского региона преимущественно равнинный. На юге и востоке Московского региона преобладают низменности с абсолютными высотами 100–150 м, а на севере и западе расположены холмистые эрозионно-моренные возвышенности с высотами до 300 м, расчлененные долинами рек и оврагами (*Спиридонов, 1978; Вагнер и Манучаряни, 2003*). Несмотря на значительную расчлененность рельефа (глубина вреза достигает нескольких десятков метров), территория исследуемого Московского региона характеризуется относительной его однородностью и преобладанием пологонаклонных поверхностей, в то время как склоны с крутизной более 10° встречаются редко, преимущественно в долинах рек и оврагах (*Мишон, 1971*). Наличие форм микрорельефа, включая биогенные формы нанорельефа с амплитудой высот до нескольких десятков

сантиметров, значительно увеличивает неоднородность поверхности и оказывает влияние на неоднородность залегания и метаморфизма снежного покрова.

Растительный покров исследуемой территории представлен древесной и травянистой растительностью. Залесённость территории составляет около 40%, от 80% на севере и востоке до 20% на юге региона. Основными лесообразующими породами являются береза, ель, сосна и осина. Открытые участки по большей части хорошо задернованы и покрыты разнотравно-злаковой растительностью (Гиряев и др., 2013). Процессы аккумуляции, метаморфизма и таяния снега на открытых и залесённых участках отличаются, что находит отражение в значительной изменчивости водозапаса, строения и свойств снежного покрова (Gelfan et al., 2004). Параметры снежного покрова на залесённых участках зависят от видового состава, возраста деревьев и густоты древостоя.

Анализ данных метеостанций Москва (ВДНХ, ТСХА, МГУ), Переславль-Залесский, Александров, Можайск и Коломна за 60-летний период с 1961 по 2020 гг. показал, что средняя температура воздуха периода с ноября по март увеличилась с -6°C в середине XX века до -4°C в начале XXI века, причем в последнее десятилетие увеличение зимней температуры воздуха происходило быстрее, чем в любое из предшествующих десятилетий.



Зимой 2019–2020 гг. средняя температура воздуха за период с ноября по март впервые за историю наблюдений достигла на исследуемой территории положительных значений.

Рис. 1 Средняя температура воздуха за период с ноября по март ($^{\circ}\text{C}$) по метеостанциям Москва (ВДНХ и ТСХА), Переславль, Александров, Можайск и Коломна за многолетний период наблюдений (URL: <http://meteo.ru/>; URL: <https://rp5.ru/>). Пунктирная линия — линейный тренд параметра по ВДНХ и ТСХА.

Анализируемая информация о количестве осадков, выпадающих в жидком, твердом и смешанном виде представлена данными метеостанций Москва (ВДНХ, ТСХА), Можайск, Коломна и Переславль-Залесский за период с 1960 по 2015 гг. Установлено, что суммарное количество осадков, выпадающих с ноября по март, относительно неизменно, в то время как сумма осадков, выпадающих с декабря по февраль, в период с 2000 по 2015 гг. на 10% больше, чем в период с 1961 по 1990 гг. в среднем по исследуемым метеостанциям. Сумма жидких осадков, выпадающих с декабря по февраль, в современный период исследований на 50% больше, чем в среднем за период с 1961 по 1990 гг., и составляет 48 мм (32% от общего количества осадков). Сумма твердых осадков, выпадающих с декабря по февраль в период с 2000 по 2015 гг., составляет 86 мм (57% от общего количества осадков), что на 10% меньше, чем в среднем за период с 1961

по 1990 гг. Установлено, что изменчивость количества осадков, выпадающих с декабря по февраль, остается высокой. Значения стандартных отклонений количества твердых (25 мм) и жидких (18 мм) осадков в 2000–2015 гг. превышают средние за период с 1961 по 1990 гг. значения (22 и 16 мм, соответственно).

Проанализированы средние многолетние значения скорости **ветра** в зимний период на исследуемой территории. Несмотря на то, что средняя скорость ветра в зимние месяцы незначительна и составляет 2–4 м/с, в отдельные дни наблюдаются условия, благоприятные для ветрового переноса и уплотнения снежного покрова, поэтому ветер является важным фактором формирования снежного покрова в Московском регионе. Анализ многолетних данных метеостанции МГУ (с 1960 по 2020 гг.) позволил установить, что среднесуточная скорость ветра на высоте 2 м в современный период исследований почти в 2 раза меньше, чем в середине XX века и составляет 2 м/с.

Анализ характеристик **снегонакопления** на территории Московского региона приведен во втором разделе главы. Анализ выполнен на основе данных метеостанций Москва (ВДНХ, ТСХА), Можайск, Коломна, Клин, Александров и Переславль-Залесский период с 1960 по 2020 гг. Рассмотрены высота снежного покрова, даты установления, максимальной высоты, разрушения и продолжительность залегания устойчивого снежного покрова, число дней с различной высотой снежного покрова. Анализ исследуемых характеристик позволил установить, что регистрируемое за период инструментальных наблюдений сокращение продолжительности залегания устойчивого снежного покрова произошло за счет смещения дат его установления на более поздний срок, в то время как даты с максимальной высотой и даты разрушения снежного покрова остались относительно неизменными (*Рис. 2*).



Рис. 2 Значения максимальной высоты, даты формирования, разрушения и продолжительности залегания устойчивого снежного покрова за период с 1960 по 2020 гг. осредненные по метеостанциям Москва (ВДНХ), Можайск, Коломна и Переславль-Залесский. (URL: <http://meteo.ru/>; URL: <https://rp5.ru/>)

Средняя продолжительность залегания устойчивого снежного покрова в период с 2001 по 2020 гг. оказалась на 11 дней меньше, чем в период с 1961 по 1990 гг. Зимами 2000–2020 гг. снежный покров формировался в среднем на 9 дней позже по сравнению с зимами 1961–1990 гг. Даты с максимальной высотой наблюдались в среднем на 6 дней

раньше, а даты разрушения снежного покрова — на 3 дня раньше, чем в период с 1961 по 1990 гг. При этом, наблюдается увеличение межгодовой изменчивости всех исследуемых параметров, которая была значительна и в XX веке. В период с 2000 по 2020 гг. наибольшие значения стандартного отклонения характерны для дат с максимальной высотой снежного покрова (26 дней), несколько меньшие — для дат установления (23 дня), еще меньшие — для дат разрушения (14 дней). Несмотря на значительный рост температуры воздуха и количества жидких осадков, выпадающих в зимний период, значения максимальной высоты снежного покрова и значения стандартного отклонения этого параметра в современный период наблюдений практически не отличаются от среднемноголетних значений и составляют 43 см и 15 см, соответственно.

Поскольку строение снежной толщи в период с максимальной высотой снежного покрова является результатом процессов, протекание и интенсивность которых зависит от зимних погодных условий и их последовательности, оно может рассматриваться как интегральная характеристика погодных условий соответствующего зимнего сезона. В третьем разделе главы выполнен анализ среднесуточных значений метеорологических параметров и характеристик снежного покрова различающимися по снежности зимами 1957/58, 1961/62 и 2014–2019 гг. в Москве и на северо-востоке Подмосковья. Анализ данных метеорологических измерений позволил установить, что зимами 1957/58 и 1961/62 гг. сумма положительных температур воздуха за период с ноября по март составила 72 °С и 80 °С, а сумма отрицательных температур — –861 °С и –833 °С, соответственно. Зимами 2014–2019 гг. сумма положительных температур составила в среднем 122 °С, а сумма отрицательных температур — –574 °С. Сумма осадков за период с ноября по март в рассматриваемые годы различалась незначительно и составила в среднем около 250 мм. Несмотря на значительно большую по сравнению с зимами 2014–2019 гг. продолжительность залегания устойчивого снежного покрова (УСП), повторяемость оттепелей зимами 1957/58 и 1961/62 гг. оказалась на 25% меньше. Анализ числа дней и суммы температурных градиентов показал, что зимами 1957/58 и 1961/62 гг., значения этих параметров оказались почти вдвое больше, чем зимами 2014–2019 гг.

Значительные различия в значениях рассматриваемых параметров в годы исследования позволили предположить, что строение снежной толщи в эти годы должно различаться. Для подтверждения этой гипотезы был выполнен анализ стратиграфических описаний, полученных автором в период с 2014 по 2019 гг. в Москве и под Сергиевым Посадом, а также описаний снежной толщи, выполненных А.В. Павловым (1976) и А.Н. Формозовым (1990) в 1957/58 и 1961/62 гг. в том же районе. Стратиграфические описания разных лет были приведены к общим показателям в соответствии с методикой, представленной в *главе 1*. Методика измерения характеристик снежной толщи и выполнения стратиграфических описаний в шурфах и траншеях включала в себя измерения высоты и плотности снежного покрова и отдельных ее слоев, расчет запасов воды в снеге, определение твердости снежной толщи, размера и типа кристаллов в каждом слое, расчет средневзвешенных характеристик. Измерения проводились автором каждые 7–10 дней, в результате чего была накоплена база данных, состоящая из более чем 300 описаний шурфов. На основе полученных данных были построены схемы развития снежной толщи зимами 2014–2019 гг. с учетом её слоистого строения (*Рис. 3, 4*).

Сравнительный анализ схем эволюции снежной толщи позволил установить, что строение снежного покрова холодными зимами 1957/58 и 1961/62 гг., считающиеся репрезентативными для начала–середины XX века (Павлов, 1962, с. 22), наблюдалось в современный период исследований только зимой 2017/18 гг., в то время как в остальные годы значительно большее развитие получили слои таяния-замерзания. Зимами 1957/58 и 1961/62 гг. в период с максимальной высотой снежного покрова слои таяния-замерзания составили всего 8–10% толщи, в то время как в период с 2014 по 2019 гг. доля слоев таяния-замерзания составила от 5 до 30% (в среднем 17%). Доля слоев с огранкой составила в среднем 60% в 1957/58 и 1961/62 гг. и 48% в период с 2014 по 2019 гг.

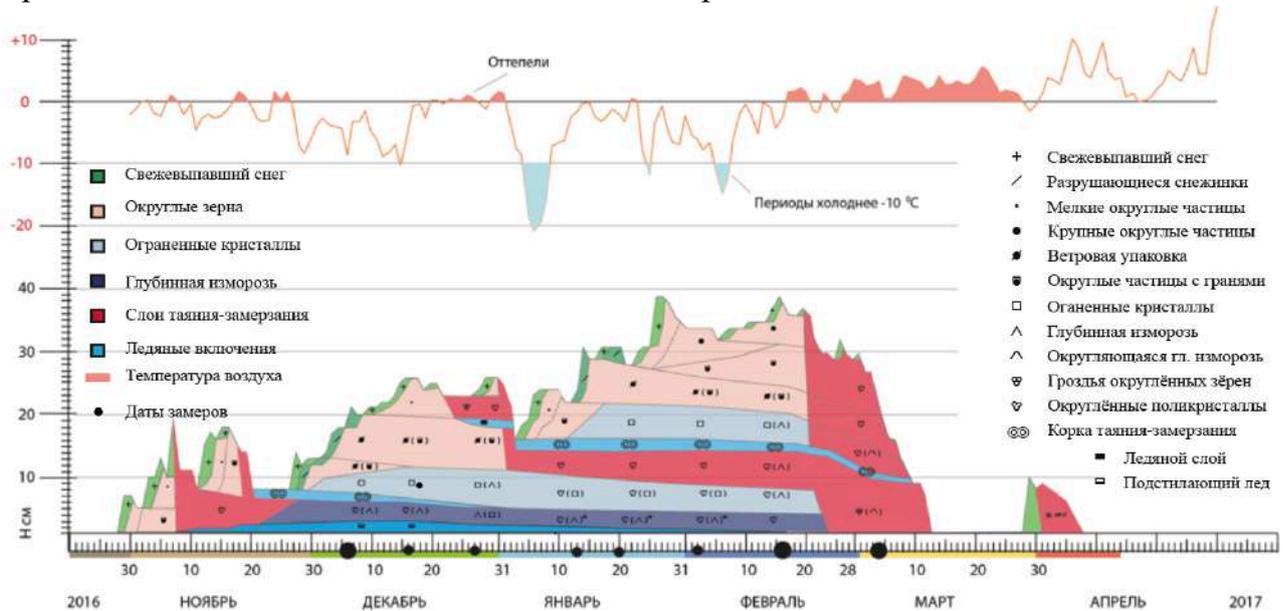


Рис. 3 Схема строения снежной толщи зимой 2016/17 гг. и температура воздуха по данным измерений на метеорологической обсерватории МГУ (Москва). Аналогичные схемы за другие зимы исследования см. текст диссертации.

Глава 3. Влияние местных факторов на строение и свойства снежного покрова в Московском регионе

Для оценки влияния изменчивости погодных условий на пространственную изменчивость строения снежного покрова в Московском регионе было осуществлено сравнение стратиграфических описаний, выполненных на участках, характеризующихся одинаковыми условиями растительного покрова и рельефа поверхности, расположенных в Москве и на юге, западе и северо-востоке Московской области зимой 2020/2021 гг. Рассматриваемые участки были расположены на открытых, защищенных от ветрового воздействия горизонтальных и пологонаклонных поверхностях (преимущественно, поляны с разнотравно-злаковой и луговой растительностью в пределах лесных ПТК). Стратиграфические описания выполнялись в шурфах шириной около 1 м. Полученные результаты свидетельствуют об однородности строения снежного покрова на исследованных участках в эту холодную и снежную зиму. Высота снежного покрова составляла от 56 до 61 см. Он был сложен слоями с огранкой (50–60%), слоями рыхлого осевшего снега (35–45%) и включал 4–5 ледяных корок в нижней части толщи. Последовательность и пропорциональное соотношение слоев в шурфах была одинаковой.

Сравнительный анализ строения и свойств снежной толщи в Москве и на северо-востоке Подмосковья на тех же участках, выполненный на основе данных полевых измерений, полученных автором в течение 5 лет в 2014–2019 гг. (Рис. 4), позволил установить, что наблюдались значительные различия в высоте и строении снежной толщи в Москве и под Сергиевым Посадом, связанные с городским «островом тепла». В «теплые» зимы наблюдались наибольшие различия, которые выражались в повышенной толщине слоев таяния-замерзания и корок и пониженной толщине слоев глубинной изморози в толще в Москве по сравнению с северо-востоком Подмосковья. Высота снежного покрова в черте города была в среднем на 16% меньше, а продолжительность его залегания — на 5 дней меньше, чем в сельской местности. В среднем за пять лет наблюдений доля слоёв таяния-замерзания в Москве была на 10% больше, чем под Сергиевым Посадом, доля слоёв с огранкой — на 10% меньше, а доля слоёв свежесвыпавшего и осевшего снега была одинакова.

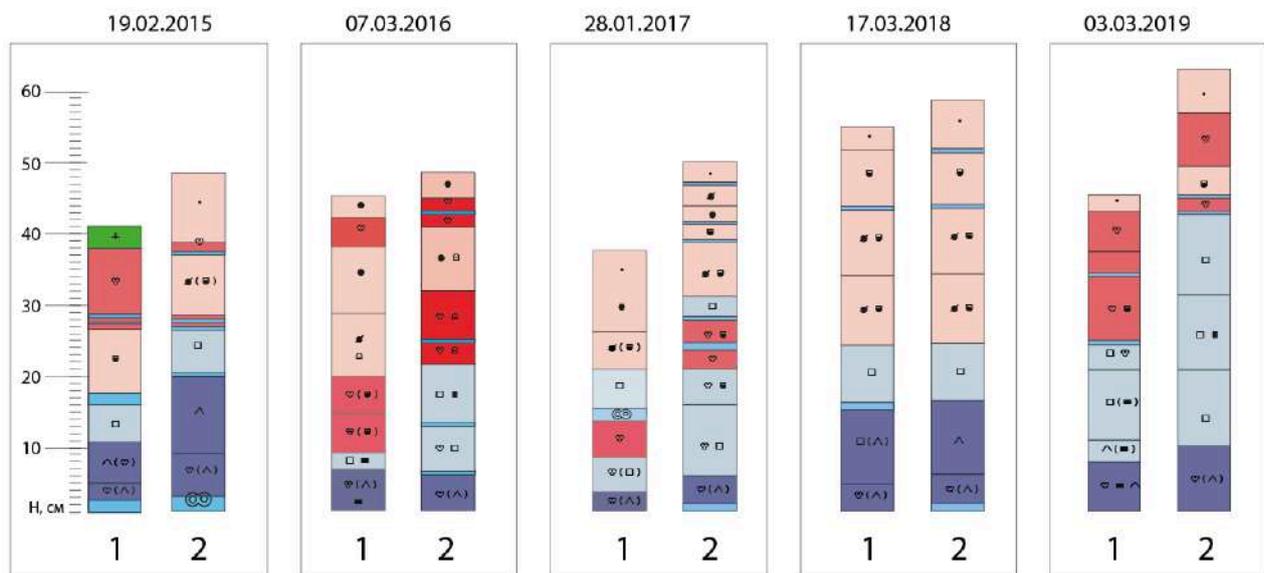


Рис. 4 Строение снежной толщи в Москве (МГУ) (1) и под Сергиевым Посадом (2) в период с максимальной высотой снежного покрова зимами 2014–2019 гг. Символьные и цветовые обозначения см. рис. 3

Поскольку строение и свойства снежной толщи определяются не только изменчивостью зимних погодных условий, но и характеристиками подстилающей поверхности, в работе рассмотрено влияние соответствующих факторов. Для этого были выполнены измерения параметров снежной толщи в шурфах (зимой 2015/16 гг.) и траншеях (зимой 2020/21 гг.) на участках, расположенных на северо-востоке Подмосковья, в пределах природно-территориальных комплексов (ПТК) различающихся условиями растительности и микрорельефа поверхности. В рамках работы выполнена оценка влияния этих факторов на особенности аккумуляции, метаморфизма и таяния снежного покрова, а также на изменчивость строения и свойств снежной толщи в масштабах первых метров. Оценка влияния крутизны и экспозиции склонов на снежный покров не производилась.

Зимой 2015/16 гг. измерения под Сергиевым Посадом проводились на трёх полигонах по методике, описанной в главе 2. Первый полигон расположен на открытом, подверженном ветровому воздействию полевом участке пологонаклонной поверхности

водораздела, с разнотравно-луговой растительностью и слабо выраженным микрорельефом поверхности, представленным травянистыми кочками высотой 5–10 см и диаметром 10-30 см, со средним расстоянием между кочками 1,5 м. Второй полигон расположен на открытом, горизонтальном участке поймы с разнотравной растительностью, защищённом от ветрового воздействия и отличающимся более выраженным микрорельефом, представленным травянистыми кочками высотой 15–20 см, диаметром 20-40 см и средним расстоянием между кочками 2 м. Третий полигон расположен на пологонаклонном участке водораздельной поверхности, в густом (40–50 деревьев на гектар) еловом лесу со слабозадернованной поверхностью и отсутствием выраженного микрорельефа (амплитуда высот менее 5 см). На рассматриваемых участках шурфы были заложены в точках, репрезентативных для данной местности — между кочками (поле и поляна) и под кроной взрослой ели на расстоянии 2 м от ствола (лес).

Установлено, что зимой 2015/2016 гг. максимальная высота снежного покрова в точках измерений на полевым участке была на 20% меньше, а в лесу, под кроной ели — на 46% меньше, чем на поляне (Рис. 5). Плотность снега на поле была в среднем на 5% больше, а в лесу — на 5% меньше, чем на поляне. Запасы воды в снеге в рассматриваемых точках на поле и на лесном участке в начале марта оказались в среднем на 18% и 50% меньше, чем на поляне, соответственно. Строение снежного покрова под кроной ели отличалось повышенной толщиной слоев таяния-замерзания. Доля слоев таяния-замерзания на поле и поляне составила 30–35%, под кроной ели — около 50% толщи.

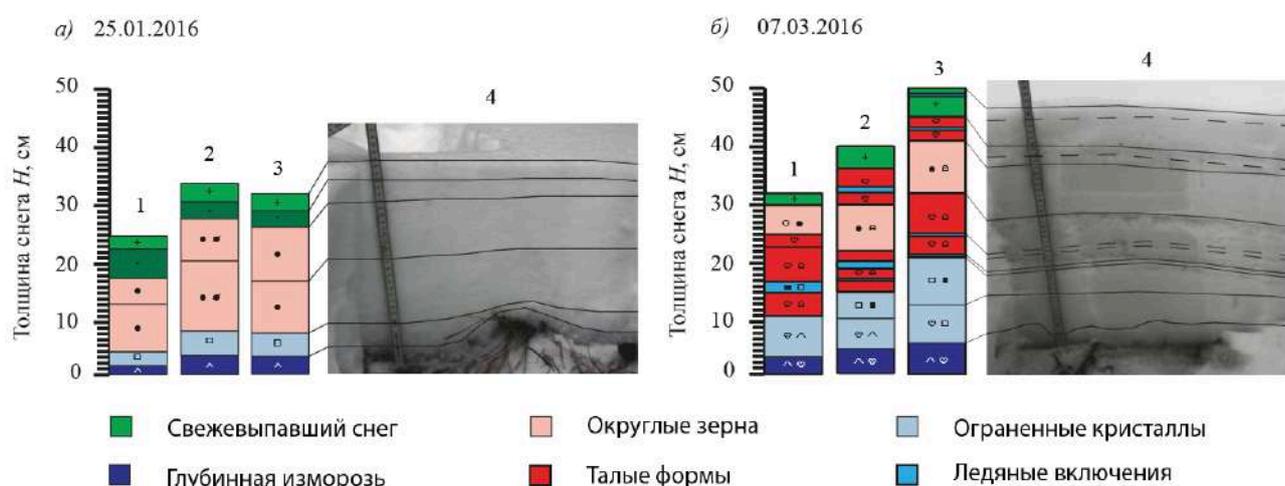


Рис. 5 Строение снежного покрова на участках исследования а) 25 января 2016; б) 7 марта 2016: 1) — лес; 2) — поле; 3), 4) — поляна. Символьные обозначения см. рис. 3.

Поскольку измерения параметров снежной толщи, выполненные в одном шурфе, характеризуют строение и свойства снежной толщи в одной точке и в небольшом радиусе вокруг этой точки, для понимания пространственного распределения свойств снежного покрова в масштабе первых метров, необходимо более подробное изучение исследуемых параметров в траншеях. На основе анализа параметров снежной толщи, измеренных вдоль траншей на северо-востоке Подмосковья зимой 2020/21 гг. были описаны основные закономерности пространственного распределения снежного покрова и отдельных его слоёв на тех же участках и выявлены факторы, оказывающие наибольшее влияние на строение снежной толщи на каждом из них. Помимо этого, был рассмотрен снежный

покров на четвёртом участке, расположенном в густом (50–60 деревьев на гектар) березовом лесу на пойме с задернованной, без кочек, поверхностью. Измерения высоты и строения снежного покрова осуществлялись вдоль траншей протяженностью 10 м с интервалом измерений 1 м. В еловом лесу траншея была заложена под кроной взрослой ели с диаметром кроны около 5 м и простиралась от ствола к внешнему радиусу кроны и продолжалась на открытом участке между кронами. Измерения плотности снежного покрова в каждой траншее осуществлялись в нескольких точках, строение снежного покрова в которых различалось в наибольшей степени.

Зимой 2020/21 гг. высота снежного покрова, осредненная по траншеям, на поле, в березовом и еловом лесу оказалась на 15, 12 и 37% меньше, чем на защищенной от ветра поляне, соответственно, что соответствует значениям, измеренным зимой 2015/16 гг. Установлено, что зимой 2020/21 гг. наибольшая изменчивость значений высоты снежного покрова наблюдалась в лесных ПТК, а наименьшая — на участках безлесных ПТК, защищенных от ветра. В траншее, заложеной в еловом лесу, изменчивость значений высоты снежного покрова зимой 2020/21 гг. увеличилась от 20% в начале зимнего периода до 25% в период с максимальными снегозапасами и до 30% в период весеннего снеготаяния. Изменчивость высоты снежного покрова на открытых безлесных участках была значительно меньше и составила в период с максимальными снегозапасами 6%, постепенно увеличиваясь по мере таяния и оседания снега и уменьшаясь по мере аккумуляции и сглаживания микрорельефа. Изменчивость высоты снежного покрова на пойменном участке, была больше, чем на полевом участке, что было обусловлено большей неоднородностью рельефа подстилающей поверхности. В березовом лесу изменчивость высоты снежного покрова составила около 10% в период максимальных снегозапасов.

Установлено, что локальные условия растительности и микрорельефа оказали значительное влияние на неоднородность распределения плотности и запасов воды в снеге на каждом из участков исследования. На участках безлесных ПТК различия в плотности и значениях водного эквивалента снежного покрова (ВЭС) в различных точках траншеи были обусловлены влиянием микрорельефа поверхности (поле и поляна) и ветрового воздействия (поле). На обоих участках высота, плотность и ВЭС в микропонижениях рельефа (между кочками) в период максимальных снегозапасов оказались на 10–20% больше, чем над кочками, причем разница увеличивалась с увеличением высоты кочек (Рис. 6).

Строение снежной толщи между кочками отличалось также повышенной долей слоев с огранкой и глубинной изморози в нижней части толщи и слоев ветрового уплотнения в средней части толщи. На лесном участке неоднородность строения и свойств была обусловлена преимущественно влиянием крон деревьев. В траншее под кроной ели были выделены 3 зоны, значительно отличающиеся по своим свойствам. Зона, примыкающая к стволу дерева, отличалась пониженной высотой и плотностью снега, и более развитыми слоями глубинной изморози. Зона воздействия опадающего с кроны снега, расположенная на периферии кроны, отличалась повышенной плотностью и запасами воды при пониженной высоте снежного покрова и сильно нарушенной стратиграфией толщи. Участки, расположенные между деревьями, отличались повышенной высотой снежного покрова, а плотность, ВЭС и строение соответствовали наблюдённым на защищенной от ветра поляне.

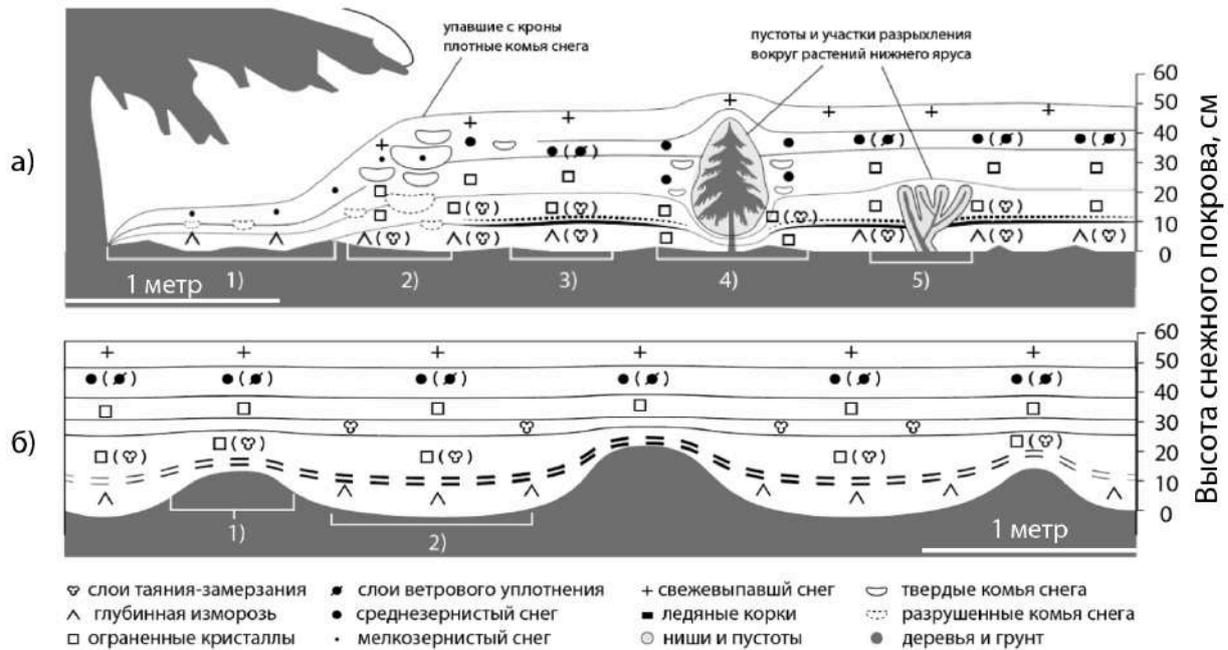


Рис. 6 Строение снежного покрова в траншеях (первые 5 метров) в период с максимальной высотой снежного покрова зимой 2020/21 гг. а) в еловом лесу под кроной ели; б) на пойменной поляне.

Исследования снежного покрова, выполненные автором в этом же районе в другие годы в период с 2014 по 2021 гг., позволяют утверждать, что описанные закономерности характерны для Подмосковья. Однако и перенос результатов в другие регионы вряд ли правомерен, так как отличия в температуре воздуха, количестве осадков, ветровом режиме, радиационном балансе, сплочённости крон, подстилающем покрове и микрорельефе могут привести к другим закономерностям (Sturm, 1992; Storck et al., 2002; Gelfan et al., 2004).

Более подробные исследования пространственно-временной изменчивости строения и свойств снежной толщи были выполнены в Москве, на территории обсерватории МГУ в траншеях протяженностью 20 м зимами 2014–2021 гг. (Рис. 7). Измерения производились на ровной, задернованной площадке с микрорельефом поверхности, представленной отдельными кочками высотой до 10–15 см. На основе описаний шурфов, которые выполнялись с шагом 1 м вдоль траншеи по методике, описанной в главе 2, был выполнен анализ изменчивости строения и свойств снежной толщи на исследуемом участке. На основе полученных данных были произведены расчеты и построены схемы пространственной неоднородности распределения значений плотности в траншеях.

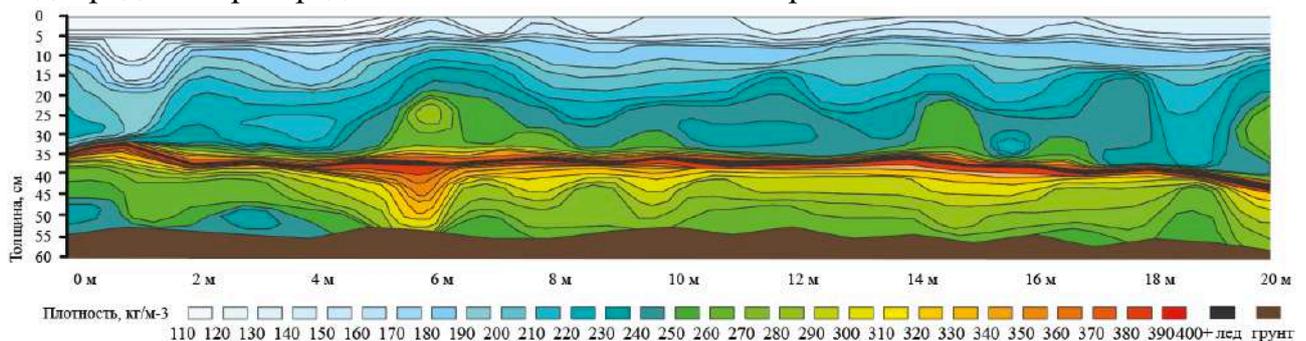


Рис. 7 Схема распределения плотности снега в траншее протяженностью 20 м на метеостанции МГУ (Москва) 20 марта 2018 года.

Для определения твердости слоёв снежной толщи и их пространственной изменчивости помимо ручного индекса твердости был применен прибор SnowMicroPen, позволяющий в полуавтоматическом режиме определять твердость снежной матрицы с дискретностью 4 мкм. Данные, полученные в шурфах и траншеях с использованием ручных и полуавтоматических методов, использовались в дальнейшем для верификации результатов определения высоты снежного покрова с использованием методов дистанционного зондирования, которые были выполнены зимой 2017/18 гг. и включали в себя съемку стандартной камерой с БПЛА (DJI Phantom 4 Pro) и лидарную съемку (Leica Nova MS60).

Анализ данных измерений, выполненных в шурфах и траншеях зимой 2017–2018 гг. позволил установить, что значения коэффициента вариации плотности и запасов воды в снеге увеличивались в течение зимнего периода по мере развития снежной толщи и увеличения количества неоднородностей, связанных с воздействием оттепелей и температурно-градиентного метаморфизма, в то время как коэффициент вариации высоты снежного покрова уменьшался по мере увеличения снегозапасов (Табл. 1).

Табл. 1 Средневзвешенные значения высоты, плотности и ВЭС и их пространственная изменчивость в траншеях протяжённостью 20 м в Москве (МГУ) зимой 2017/2018 гг.

Дата	23.01.2018	06.02.2018	20.03.2018	03.04.2018
Высота	19 см	53 см	54 см	29 см
Коэффициент вариации	0,06	0,05	0,03	0,08
Плотность	137 кг/м ³	185 кг/м ³	240 кг/м ³	380 кг/м ³
Коэффициент вариации	0,04	0,03	0,07	0,11
ВЭС	26 мм	99 мм	131 мм	110 мм
Коэффициент вариации	0,07	0,06	0,08	0,13

Также, установлено, что изменчивость плотности и запасов воды в снеге в период максимальных снегозапасов больше, чем высоты снежной толщи, а изменчивость исследуемых параметров в отдельных слоях больше, чем в среднем по толще. В период с максимальными снегозапасами вариация толщины отдельных слоев составила от 12 до 27%, плотности — от 8 до 12%, ВЭС — от 13 до 33%. Наибольшая изменчивость была характерна для слоев, подверженных процессам температурно-градиентного метаморфизма, фирнизованных слоев смерзшихся поликристаллов, а также слоев, подвергшихся ветровому уплотнению в процессе аккумуляции снега. В пределах одного слоя разница ВЭС между соседними измерениями достигала 100% и более.

Измерения твёрдости слоёв снега с использованием прибора SnowMicroPen. осуществлялись с шагом 0,5 м вдоль траншеи протяжённостью 10 м, и сопровождалась определением толщины слоёв, их плотности, температуры, размера и формы зёрен. Всего было выполнено шесть серий таких измерений в 2014/2015 гг. и восемь в 2016/2017 гг. (всего 294 замера). Изменчивость значений твёрдости оценивалась по вертикальным профилям и рассчитывалась для каждого слоя как отношение среднего квадратического отклонения значений в этом слое к их средней арифметической.

Изменчивость твёрдости и других параметров снежного покрова вдоль траншеи исследовалась аналогичным образом, однако исходными данными служили осреднённые по слоям значения. Таким образом, для каждого слоя сравнивались средние значения твёрдости, полученные по 21 вертикальному профилю. Исследования неоднородности твёрдости слоёв снега подтвердили выводы, сделанные на основе анализа распределения плотности снежной толщи и показали, что изменчивость снежного покрова существенна даже в пределах ровной однородной площадки со слабовыраженным микрорельефом поверхности. Изменчивость твёрдости слоёв снежной толщи вдоль траншеи протяженностью 10 м оказалась значительно больше, чем изменчивость ее высоты, плотности и ВЭС. Значения твёрдости и её коэффициентов вариации возрастают с увеличением плотности, льдистости и размера кристаллов слоя, в частности, с увеличением числа циклов таяния-замерзания и степени подверженности толщи температурно-градиентному метаморфизму. В периоды снеготаяния значения твёрдости уменьшаются за счёт разрушения связей между зёрнами, а вариация, напротив, возрастает. Высокие значения коэффициентов вариации наблюдаются также в слоях, сложенных кристаллами в начальной стадии огранки, что указывает на неравномерность роста кристаллов снега даже в пределах визуально однородных слоёв.

Данные о высоте снежного покрова, измеренные в траншеях во время работ по изучению строения и свойств снежного покрова в Москве были использованы для верификации данных измерений методами дистанционного зондирования. Работы по определению высоты снежного покрова с применением съемки с БПЛА были выполнены зимой 2017/18 гг. на территории метеорологической обсерватории МГУ. В ходе исследования было выяснено, что наиболее важными факторами, влияющим на успешность проведения автоматизированной фотограмметрической обработки (и, в конечном счёте, на успешность определения высоты снежного покрова), являются состояние поверхности снежного покрова и освещённость территории. Фотографии лежалого снега гораздо лучше поддаются обработке, чем фотографии свежеснегоснежного покрова, независимо от условий освещения. Съёмку свежеснегоснежного покрова можно проводить при ярком солнечном освещении; в пасмурную погоду изображение свежеснегоснежного покрова становится практически монотонным и, следовательно, непригодным для фотограмметрической обработки. Точность определения высоты снежного покрова составила 6 см, максимальная ошибка — 15 см.

Глава 4 Алгоритм восстановления и прогноза строения снежного покрова на основе данных метеорологических наблюдений

Развитие методов математического моделирования характеристик снежного покрова обусловлено необходимостью их параметризации в климатических и гидрологических моделях. Существующие модели снежного покрова отличаются по своей сложности и набору параметров, необходимых для корректной работы заложенных алгоритмов. В наиболее простых моделях (*Douville et al., 1995; Bazile et al., 2002*) снежный покров представляется в виде индексов, характеризующих его как одномерный однослойный объект. Учет слоистого строения снежного покрова и процессов, происходящих в нем, позволяет увеличить точность гидрологического прогноза и определения составляющих энергетического баланса (*Essery et al., 1998*). Однако в некоторых случаях, например, когда

разрешение и качество входящих данных ограничено, простая модель может быть более уместна, чем сложная.

В работе предложен алгоритм, позволяющей восстанавливать и прогнозировать строение снежного покрова на основе среднесуточных значений стандартных метеорологических параметров, доступных на большинстве метеостанций, без учета составляющих энергетического баланса. Он позволяет отнести каждый слой снега к тому или иному типу и проследить его развитие на протяжении всего зимнего периода. Такой подход удобен для оценки многолетней изменчивости строения снежного покрова в тех местах и в такие временные промежутки, для которых отсутствуют стратиграфические описания, а также в окрестностях метеостанций, для которых доступны лишь осредненные значения метеорологических параметров, которых недостаточно для моделирования снежного покрова с использованием таких сложных моделей как Snowpack и Crocus (Brun et al., 1989; Bartelt & Lehning, 2002).

Методика восстановления строения снежной толщи включает в себя несколько этапов. На первом этапе выполняется формирование базы данных, которая включает информацию о среднесуточной температуре воздуха и поверхности почвы под снегом, количестве осадков, скорости ветра, а также высоте снежного покрова по данным ежедневных измерений. На втором этапе на основе значений среднесуточной температуры воздуха, поверхности почвы под снегом и высоты снежного покрова рассчитываются значения температурного градиента в снежной толще, а также определялось изменение высоты снежного покрова за прошедшие сутки. На третьем этапе на основе значений исследуемых среднесуточных параметров с использованием разработанного алгоритма производится анализ погодных условий и определяются факторы, оказывающие влияние на формирование и последующее развитие слоев снежной толщи, причем на каждом последующем шаге расчётов учитываются результаты предыдущих шагов, а также наличие и свойства расположенных выше слоев, если таковые имеются.

Согласно алгоритму, в первый день залегания снежного покрова в зависимости от метеорологических условий могут формироваться слои 3-х типов: *свежевыпавшего сухого снега, свежевыпавшего влажного снега или слои ветрового уплотнения*. Затем эти слои подвергаются изменениям, которые зависят от внешних (погодные условия) и внутренних (строение снежной толщи) условий. Для отнесения слоя к тому или иному типу выбираются такие пороговые значения исследуемых параметров, которые являются необходимыми для возникновения тех или иных процессов в снежной толще (Табл. 2) и которые согласуются с результатами предшествующих российских и международных наблюдений и натурных измерений.

Табл. 2 Заложенные в алгоритм условия формирования слоев и соответствующие им типы снега. Выделенные типы снега соответствуют Международной классификации снежного покрова (Фирц и др., 2012).

Тип снега	Индекс	Условия формирования
Свежевыпавший сухой	FS	$dH > 0$ см; $T < 0$ °C; $W < 3$ м/с
Свежевыпавший влажный	Wet	$dH > 0$ см; $T > 0$ °C

Тип снега	Индекс	Условия формирования
Ветрового уплотнения	WS	$dH > 0$ см; $T < 0$ °C; $W \geq 3$ м/с
Мелкозернистый осевший	RG1	$T < 0$; тип FS сохраняется непрерывно в течение 5 дней, либо состояние снега на предыдущий день Wet
Среднезернистый осевший	RG2	$T < 0$; тип RG1 сохраняется непрерывно в течение 15 дней
Крупнозернистый осевший	RG3	$T < 0$; тип RG2 сохраняется непрерывно в течение 15 дней
Крупнозернистый с огранкой	FC	$T < 0$; Тип RG1 сохраняется непрерывно в течение 5 дней; температурный градиент в толще более 25 °C/м сохраняется непрерывно в течение 5 дней. $T < 0$; Тип RG2 сохраняется непрерывно в течение 5 дней; число дней с температурным градиентом в толще более 25 °C/м за последние 15 дней не менее 10. $T < 0$; Тип RG3 сохраняется непрерывно в течение 5 дней; число дней с температурным градиентом в толще более 25 °C/см за последние 30 дней не менее 15. $T < 0$; Тип WSRG1 сохраняется непрерывно в течение 5 дней; число дней с температурным градиентом в толще более 25 °C/см за последние 15 дней не менее 10.
Глубинная изморозь	DH	$T < 0$; Тип FC сохраняется непрерывно в течение 10 дней; число дней с температурным градиентом в толще более 25 °C/см за последние 15 дней не менее 10. $T < 0$; Тип FC сохраняется непрерывно в течение 20 дней;
Слой таяния-замерзания	Firn	$T < 0$; В предыдущий день наблюдался тип Melt; в предыдущие 5 дней не наблюдались типы FC, DH или FirnDH.
Слой таяния-замерзания с огранкой	FirnFC	Тип Firn сохраняется непрерывно в течение 10 дней; число дней с температурным градиентом в толще более 25 °C/м за последние 15 дней не менее 10. Тип Firn наблюдается в течение 15 и более дней за последние 20 дней при отсутствии типа Melt в этот период; число дней с температурным градиентом в толще более 25 °C/м за последние 15 дней не менее 10. Тип FC, DH или FirnDH наблюдается хотя бы один раз за последние 7 дней; тип Melt наблюдается хотя бы один раз за последние 7 дней.
Слой таяния-замерзания с кристаллами глубинной изморози	FirnDH	Тип FirnFC сохраняется непрерывно в течение 10 дней; число дней с температурным градиентом в толще более 25 °C/м за последние 15 дней не менее 10.
Слой ветрового уплотнения с огранкой	WSRG1	$T < 0$; тип WS сохраняется непрерывно в течение 15 дней
Талый снег	Melt	$T > 0$; $dH < 0$; число слоев над рассматриваемым слоем не более 4. $T > 0$; $dH < 0$; число слоев над рассматриваемым слоем не более 10; сумма положительных температур за 3 дня не менее 1 °C. $T > 0$; $dH < 0$; число слоев над рассматриваемым слоем не более 15, сумма положительных температур за 3 дня не менее 3 °C.

На основе предложенного алгоритма были выполнены расчеты и визуализация полученных результатов в программе Excel. В полученной схеме каждая ячейка характеризует состояние каждого отдельного слоя в каждый день исследуемого

периода (Рис. 8). Каждой ячейке на основе алгоритма, в основу которого положены условия, представленные в Табл. 2, присваивается определенный тип снега, характеризующийся определенным сочетанием формы и размера кристаллов.

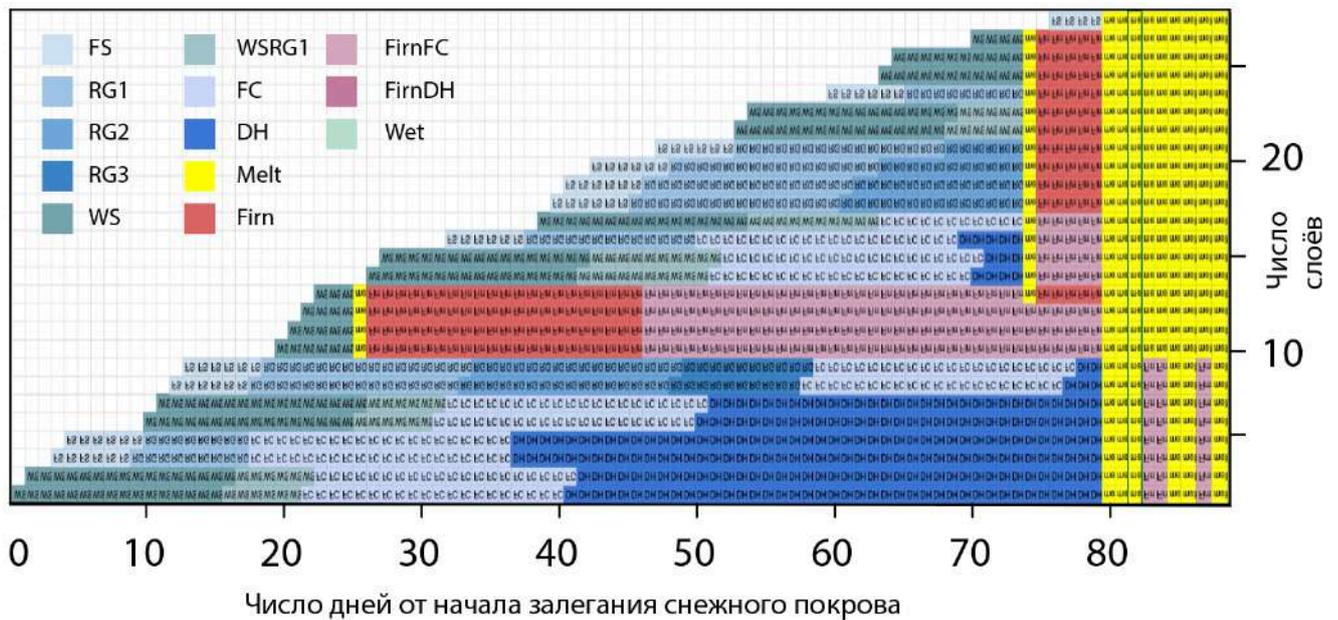


Рис. 8 Схема строения снежного покрова зимой 2017–2018 гг., построенная на основе предложенного алгоритма. Условные обозначения см. Табл. 2.

Совокупность всех ячеек, рассмотренная за период от начала залегания УСП до определенной даты, характеризует снежную толщину за этот период, то есть является интегральной характеристикой зимних погодных условий предшествующего периода. Такой подход открывает возможности для оценки многолетней изменчивости строения снежной толщи даже при отсутствии натуральных описаний шурфов.

Для верификации алгоритма были использованы данные метеостанции МГУ за период с 2014 по 2019 гг. Сравнение фактического и смоделированного строения снежной толщи, выполненное для периода с максимальной высотой снежного покрова зимами 2014–2019 гг., показало, что алгоритм позволяет верно восстанавливать тип и пропорциональное соотношение основных типов слоев в снежной толще (Рис. 9).

Точность предложенного алгоритма составила 86% (от 58 до 90%), причем в холодные зимы точность восстановления строения снежной толщи была больше, чем в теплые, когда значительные изменения в строении снежной толщи происходили за счет таяния и просачивания воды сквозь толщу. Сравнение результатов выполнения алгоритма с данными наблюдений на Аляске, в условиях резко-континентального климата, зимой 2000/2021 гг. позволило установить, что точность восстановления строения снежной толщи оказалась весьма высокой и составила 91%. Ошибки в определении типов слоев снега в снежной толще возникали за счет отнесения слоёв таяния-замерзания и ветрового уплотнения, подвергавшихся процессам температурно-градиентного метаморфизма, к типу слоёв с огранкой и были обусловлены использованием осредненных за сутки значений метеорологических параметров.

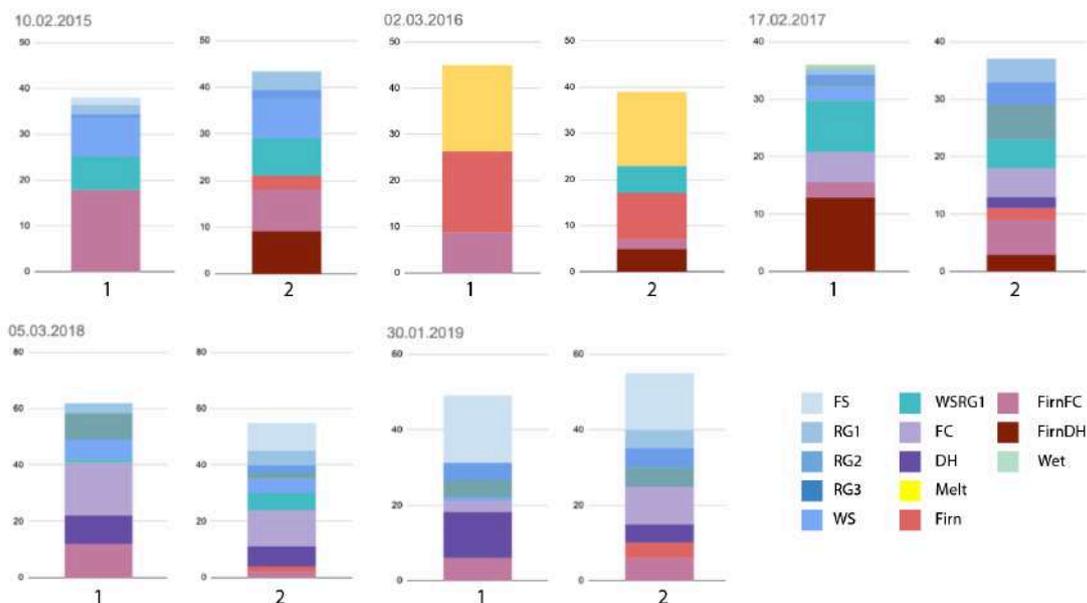


Рис. 9 Строение снежного покрова зимами 2014–2019 гг. в период с максимальной высотой снежного покрова. 1 — построенные на основе предложенного алгоритма. 2 — построенные по данным измерений в шурфах. Условные обозначения см. Табл. 2.

Анализ результатов выполнения алгоритма позволил восстановить строение снежной толщи в предыдущие годы, в том числе в те, когда натурных измерений не проводилось, и установить, что зимние условия снегонакопления и последующего развития снежной толщи, значительно различающиеся в периоды с 1955 по 1963 и с 2011 по 2019 гг., привели к различиям в характерном строении снежной толщи в эти два периода (Рис. 10). В последние годы значительно большее развитие получили слои таяния-замерзания, а слои глубинной изморози оказались менее развиты. Они формировались значительно реже и не каждую зиму. Если в период с 1955 по 1963 гг. слои с огранкой слагали в среднем около 60% снежной толщи, то в период с 2011 по 2019 гг. — менее 40%, в то время как доля слоев таяния-замерзания составила 20 до 35%, соответственно. Таким образом подтверждаются выводы об изменении характерного строения снежной толщи, сделанные на основе анализа ограниченного количества стратиграфических описаний в главе 2.

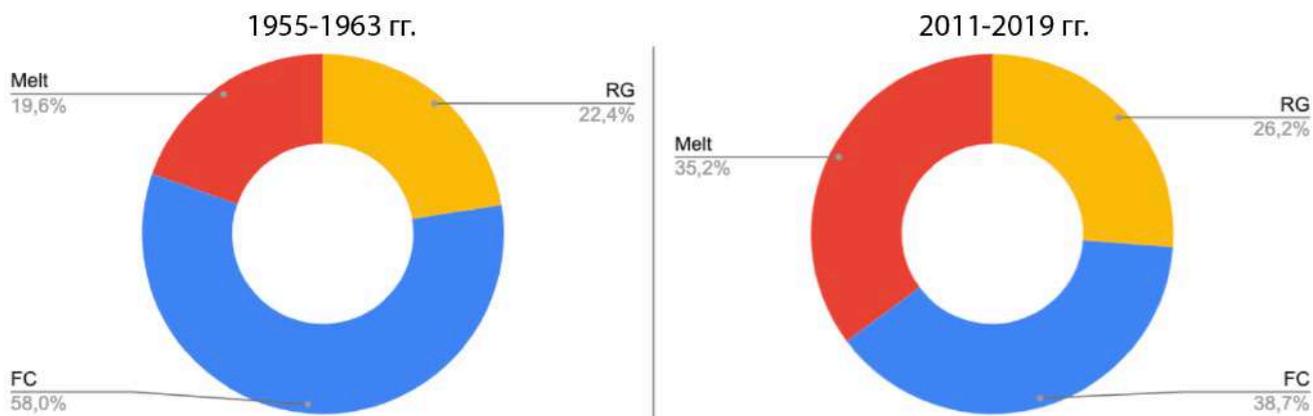


Рис. 10 Пропорции слоев снега в снежной толще, осредненные за периоды с 1955 по 1963 гг. и с 2011 по 2019 гг. RG — свежесвыпавший и осевший; FC — с огранкой и глубинной изморози; Melt — таяния-замерзания.

Поскольку предложенный алгоритм позволяет достоверно восстанавливать строение снежной толщи он может быть применен для прогноза строения снежной толщи, которое может ожидаться при тех или иных изменениях значений заложенных в алгоритм параметров. Проработан сценарий, при котором среднесуточная температура воздуха выше наблюдаемой на 1 °С. Для этого были взяты данные реальных наблюдений зимой 2016/2017 и 2017/2018 гг. и средние суточные температуры воздуха были увеличены на 1 °С, при сохранении прочих показателей в неизменном виде. При увеличении среднесуточных температур воздуха на 1 °С обеими зимами доля слоев таяния-замерзания оказалась более чем в 2 раза больше по сравнению с результатами натуральных измерений, а доля слоев с огранкой значительно сократилась.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования снежного покрова в Московском регионе позволили сделать следующие выводы:

1) Наблюдаемые на исследуемой территории изменения зимних погодных условий оказывают влияние на характеристики снежного покрова. На фоне роста зимней температуры воздуха и увеличения количества жидких осадков наблюдается сокращение продолжительности залегания снежного покрова, в то время как максимальная высота снежного покрова остается относительно неизменной. При этом, наблюдается увеличение изменчивости характеристик снежного покрова. Совокупность этих тенденций находит отражение в строении снежной толщи в исследуемом Московском регионе.

2) Совместный анализ стратиграфических описаний снежной толщи и данных метеорологических наблюдений, осредненных за сутки, позволил установить, что зимами 1957/58 и 1961/62 гг. строение снежного покрова отличалось от наблюдаемых зимами 2014–2019 гг. повышенной толщиной слоев с огранкой и пониженной толщиной слоев таяния-замерзания, что обусловлено более низкими зимними температурами воздуха и вдвое более низкой повторяемостью оттепелей в эти годы.

3) Результаты выполнения разработанного и верифицированного автором алгоритма восстановления строения снежной толщи на основе анализа среднесуточных значений метеорологических параметров позволили установить, что зимами 1955–1963 гг. доля слоев с огранкой оказалась в среднем на 19% больше, чем зимами 2014–2019 гг., а доля слоёв таяния-замерзания — на 15% меньше. Таким образом вывод о возможных изменениях в строении снежной толщи, связанных с климатическими изменениями, сделанный на основе анализа данных 1957/58 и 1961/62 гг., подтверждается. Точность восстановления строения снежной толщи составляет 86%.

4) Анализ параметров снежного покрова и его строения в шурфах и траншеях позволил оценить его пространственную изменчивость, обусловленную погодными условиями, растительностью и микрорельефом поверхности. Установлено, что строение и свойства снежного покрова на залесённых и незалесённых участках значительно различаются. Наибольшая неоднородность снежного покрова наблюдается на лесных участках и обусловлена влиянием крон деревьев, в то время как на открытых участках она меньше и связана преимущественно с влиянием микрорельефа поверхности.

5) Неоднородность строения и свойств снежного покрова, связанная с наличием микрорельефа поверхности, высока даже на однородном открытом защищённом от ветра участке. В период с максимальной высотой снежного покрова коэффициент вариации значений высоты меньше, чем значений плотности и водного эквивалента снежной толщи на этом участке. Разница в значениях высоты, плотности и запасов воды в снежной толще между соседними точками, расположенными на расстоянии 1 м, достигает 30%.

6) Установлено, что наиболее важными факторами, влияющим на успешность проведения автоматизированной фотограмметрической обработки и определения высоты снежного покрова, являются состояние поверхности снежного покрова и освещённость территории. Максимальные разности высот, полученных на основе аэрофотосъёмки, и наземных измерений не превышают 15 см, а среднеквадратическая ошибка составляет порядка 6 см.

Полученные результаты и сделанные выводы свидетельствуют о необходимости дальнейших исследования снежного покрова на рассматриваемой территории в различных пространственно-временных масштабах. Актуальными задачами будущих исследований являются оценка изменчивости снежного покрова на участках с различающимися характеристиками (видовым составом, возрастом и густотой) растительного покрова и рельефа подстилающей поверхности, оценка влияния мезоформ рельефа, различий в экспозиции и крутизне склонов на строение и свойства снежного покрова, развитие методов ландшафтной индикации, совершенствование и широкое применение методов дистанционного зондирования, хорошо зарекомендовавших себя в настоящем исследовании.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.8 (25.00.31):

1. **Комаров А.Ю.** Влияние растительности и микрорельефа на стратиграфию снежного покрова в Подмоскowie // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2021. — № 6. — С. 77–88.
2. **Комаров А.Ю.** Строение снежного покрова на северо-востоке Московской области // Лёд и снег. — 2021. — Т. 61, № 3. — С. 391–403. — doi: 10.31857/s2076673421030096.
3. **Komarov A.Y., Seliverstov Y.G., Grebennikov P.B., Sokratov S.A.** Spatial variability of snow water equivalent – The case study from the research site in Khibiny Mountains, Russia // Journal of Hydrology and Hydromechanics. — 2019. — Т. 67. — № 1. — С. 110–112. — doi: 10.2478/johh-2018-0016.
4. **Комаров А.Ю., Селиверстов Ю.Г., Гребенников П.Б., Сократов С.А.** Пространственно-временная неоднородность снежной толщи по данным пенетрометра SnowMicroPen // Лёд и Снег. — 2018. — Т. 58. — № 4. — С. 473–485. — doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-473-485.
5. **Komarov A.Y., Seliverstov Y.G., Glazovskaya T.G., Turchaninova A.S.** Risk assessment in the North Caucasus ski resorts // Natural Hazards and Earth System Sciences. — 2016. — Т. 16. — № 10. — С. 2227–2234. — doi: 10.5194/nhess-16-2227-2016.

Главы в монографиях:

6. Фролов Д.М., **Комаров А.Ю.**, и др. Изучение пространственно-временной неоднородности снежной толщи на площадке МО МГУ зимой 2018/2019 гг. // Эколого-климатические характеристики атмосферы Москвы в 2018 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова. — М.: МАКС Пресс, 2019. — С. 225–230.

7. **Комаров А.Ю.**, и др. Изучение пространственно-временной неоднородности снежной толщи на площадке Метеорологической обсерватории МГУ зимой 2017/2018 гг // Эколого-климатические характеристики атмосферы Москвы в 2017 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова. — М.: МАКС Пресс, 2018. — С. 199–203.

8. **Комаров А.Ю.**, и др. Изучение пространственно-временной неоднородности снежной толщи на площадке метеорологической обсерватории МГУ зимой 2016/2017 гг. // Эколого-климатические характеристики атмосферы в 2016 г. по данным метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова. — М.: МАКС Пресс, 2017. — С. 190–202.

9. **Комаров А.Ю.**, и др. Изучение пространственно-временной неоднородности снежной толщи с использованием пенетрометра высокого разрешения SnowMicroPen на территории метеорологической обсерватории МГУ // Эколого-климатические характеристики атмосферы в 2015 г. по данным метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова, — М.: МАКС Пресс, 2016. — С. 201–210.

10. **Комаров А.Ю.**, и др. Крупномасштабная оценка коллективного и индивидуального лавинного риска на примере горнолыжного комплекса Ведучи (Чеченская Республика) // Снежные лавины, сели и оценка риска. Выпуск 3. — М.: «Перо», 2014. — С. 50–58.

Публикации в материалах конференций:

11. Энтин А.Л., Сучилин А.А. Селиверстов Ю.Г., Сократов С.А., Гребенников П.А., **Комаров А.Ю.**, Турчанинова А.С. Определение снегозапасов с использованием крупномасштабного дистанционного зондирования // Инженерные изыскания в строительстве. Материалы докладов XV Общероссийской конференции изыскательских организаций — М.: Геомаркетинг, 2019. — С. 112–117.

12. Turchaninova A.S., Seliverstov Y.G., Sokratov S.A., **Komarov A.Y.** Avalanche hazard zoning for the land use planning in the Russian Arctic. // Proceedings of the International conference «Solving the puzzles from cryosphere». — Pushchino, Russia, 15-18 April 2019. — P. 95–96.

13. Sokratov S.A., Seliverstov Y.G., **Komarov A.Y.**, et al. Simultaneous use of different techniques in assessment of spatial-temporal variability of the characteristics of snow cover // Proceedings of the International Snow Science Workshop ISSW 2018, Innsbruck, Austria, 7–12 October 2018. — Innsbruck: ISSW, 2018. — P. 373–376.

14. **Komarov A.**, Seliverstov Y., Turchaninova A., Sokratov S. A new approach to avalanche risk assessment in Russia // Proceedings of the International Snow Science Workshop ISSW 2018, Innsbruck, Austria, 7–12 October 2018 — Innsbruck ISSW, 2018 — P. 241–245.

15. Turchaninova A., Seliverstov Y., **Komarov A.**, Sokratov S., Loginova E. A successful attempt to introduce the protective dams into snow avalanches simulations by RAMMS in the Khibini Mountains, Russia // Proceedings of the International Snow Science Workshop ISSW 2018, Innsbruck, Austria, 7–12 October 2018 — Innsbruck ISSW, 2018 — P. 778–782.

16. Lazarev A., Turchaninova A., Seliverstov Y., **Komarov A.**, Sokratov S. Estimation of accumulation from snow avalanches on the mountain glaciers // Proceedings of the International Snow Science Workshop ISSW 2018, Innsbruck, Austria, 7–12 October 2018 — Innsbruck ISSW, 2018 — P. 488-492

17. Энтин А.Л., Сучилин А.А., Владимирова М.Р., Сократов С.А., **Комаров А.Ю.**, Турчанинова А.С., Гребенников П.Б., Селиверстов Ю.Г. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для построения модели высоты снежного покрова // Национальная картографическая конференция 2018. Сборник тезисов. Москва, 16-19 Октября 2018. — С. 295–296.

18. Селиверстов Ю.Г., Турчанинова А.С., Сократов С.А., **Комаров А.Ю.**, Глазовская Т.Г. Зонирование по степени лавинной опасности и риска при градостроительной деятельности (на примере Хибин) // Инженерные изыскания в строительстве. Материалы докладов XIV Общероссийской конференции изыскательских организаций. — М.: Геомаркетинг, 2018. — С. 170–175.

19. **Комаров А.Ю.**, и др. Изучение пространственно-временной неоднородности снежной толщи с использованием пенетрометра SnowmicroPen // III Международный симпозиум «Физика, химия и механика снега»: сборник докладов, часть II, Южно-Сахалинск, 2–6 октября 2017 г. — Южно-Сахалинск: Сахалинский филиал ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, 2017. — С. 64–68.

20. Родионова П.М., **Комаров А.Ю.**, Турчанинова А.С., Селиверстов Ю.Г. Анализ противолавинных мероприятий для оценки лавинного риска на Красной Поляне // III Международный симпозиум «Физика, химия и механика снега»: сборник докладов, часть II, Южно-Сахалинск, 2–6 октября 2017 г — Южно-Сахалинск: Сахалинский филиал ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, 2017 — С. 130-135

21. **Комаров А.Ю.**, и др. Методические аспекты использования пенетрометра SnowMicroPen при снеголавинных исследованиях // Географические исследования молодых ученых в регионах Азии: материалы Всероссийской молодежной конференции с международным участием, 7–11 ноября 2016 г. — Барнаул: «Пять плюс», 2016. — С. 171–176.

Прочие публикации:

22. СП 428.1325800.2018. Инженерные изыскания для строительства в лавиноопасных районах. Общие требования / Богданов М.И., Болгова Г.Р., Леденева Е.В., Шныпарков А.Л., Сократов С.А., Селиверстов Ю.Г., Глазовская Т.Г., **Комаров А.Ю.**, Турчанинова А.С. — М: МинСтрой, 2018.

23. Лазарев А.В., Турчанинова А.С., Селиверстов Ю.Г., Глазовская Т.Г., Сократов С.А., **Комаров А.Ю.** Моделирование снежных лавин для обоснования выбора противолавинных мероприятий // Геориск. — 2017. — № 3. — С. 50–57.