

Строение снежного покрова на северо-востоке Московской области

© 2021 г. А.Ю. Комаров

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
ankom9@gmail.com**Snow cover stratigraphy in the northeast of Moscow region**

A.Yu. Komarov

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
ankom9@gmail.com

Received November 30, 2020 / Revised April 9, 2021 / Accepted June 25, 2021

Keywords: *snowpack stratigraphy, snow cover classification, snow metamorphism, Moscow Region.***Summary**

Snow stratigraphy can be considered as an integral characteristic of weather conditions of the corresponding winter season. The stratigraphic approach is convenient for a comparative analysis of the snow stratigraphy at different spatial-temporal scales, including the variability of the snow cover due to climate change. The snow stratigraphy can be sufficiently modeled on the basis of three meteorological characteristics: air temperature, wind speed and precipitation. Consequently, significant differences in the winter meteorological conditions should produce different stratigraphy. In the Moscow region winter temperatures are almost three degrees higher in the 21-st century compared to the middle of the 20th century, though precipitation and wind speed are similar. Thus, changes in the snow stratigraphy can be expected. Comparative analysis of the results of stratigraphic studies carried out in the mid-1950s to 1960s and 2010s indicates a slight decrease in the proportion of faceted crystal and depth hoar layers and increase in melt-freeze layers during the last decade, while the proportion of settled layers composed by rounded grains remains relatively invariable. However, the interannual variability of the winter weather produces higher variability in the snow structure compared to the expected effect of the long-term climate trends. The spatial distribution of the melt-freeze layers in the 2014–2019 was different compared to 1957/58 and 1961/62 due to the increase in the number and intensity of thaws in the winter seasons. In the 2010s, the number and thickness of ice crusts and melt-freeze layers increased in the middle part of the strata, which usually forms in January–February. Such layers composed 5 to 31% (17% in average) in 2014–2019 winters, while in 1957/58 and 1961/62 it was 7 and 10% respectively. A further increase in winter temperatures can enhance changes in snow stratigraphy and properties. It may result in thicker melt-freeze layers, weaker kinetic growth and shorter winter seasons.

Citation: Komarov A.Yu. Snow cover stratigraphy in the northeast of Moscow region. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021. 61 (3): 391–403. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421030096.

Поступила 30 ноября 2020 г. / После доработки 9 апреля 2021 г. / Принята к печати 25 июня 2021 г.

Ключевые слова: *стратиграфия снежной толщи, классификация снежного покрова, метаморфизм снега, Московская область.*

Представлены результаты исследования строения снежной толщи, выполненные в 2014–2019 гг. на северо-востоке Московской области на открытом незалесённом участке в периоды максимальных снегозапасов. Проведено сравнение полученных данных с результатами исследований снежной толщи, выполненными в том же районе А.Н. Формозовым и А.П. Павловым в 1950–60-х годах. Установлено, что строение снежной толщи в 1957/58 и 1961/62 гг., считающихся типичными для исследуемой территории, отличается от строения в 2014–2019 гг., что может быть обусловлено увеличением зимних температур воздуха, а также числа и интенсивности оттепелей во второй половине XX – начале XXI в. При этом сохраняется большая межгодовая изменчивость зимних погодных условий, влияние которой на строение снежной толщи оказывается большим, чем влияние многолетних трендов.

Введение

Стратиграфические исследования занимают важное место в системе наук о снежном покрове. Информация о высоте, типах и свойствах слоёв снега представляет собой значительный

интерес, поскольку может рассматриваться как интегральная характеристика погодных условий соответствующего зимнего сезона [1, 2]. Стратиграфический подход открывает возможности для сравнительного анализа строения снежной толщи в разных пространственных и времен-

ных масштабах, в том числе для анализа изменчивости снежного покрова в условиях изменяющегося климата. При отсутствии прямых метеорологических наблюдений анализ стратиграфических колонок позволяет получать информацию о предшествующих зимних погодных условиях, характере аккумуляции и метаморфизма снежного покрова. Однако сравнение стратиграфических профилей, полученных в различных условиях, требует согласованности в методах описания и представления результатов. Используемые в описаниях классификации снежного покрова [3–5] были призваны помочь в объективной интерпретации результатов анализа стратиграфических колонок, но подходы, заложенные в классификациях, отличались. Поэтому сравнение разновременных описаний стратиграфических разрезов, выполненных на их основе, вызывало определённые затруднения. Как показали исследования М. Стурма [6], строение снежной толщи в достаточной мере может быть смоделировано на основе трёх метеорологических характеристик: температуры воздуха, скорости ветра и атмосферных осадков. Увеличение зимних температур воздуха в районе исследования позволяет ожидать изменений в строении снежной толщи, а значит, и в её теплофизических свойствах.

Стратиграфические исследования снежного покрова на северо-востоке Московской области проводились редко, только в рамках специальных исследований [7–9]. Эти работы — основной источник информации о строении снежной толщи и её изменчивости в течение зимнего сезона в данном регионе. Примеры опубликованных стратиграфических колонок [7, 9] считаются типичными для исследуемого района, несмотря на то, что измерения были выполнены более 60 лет назад. Поскольку период с 1950–60-х годов по настоящее время характеризуется значительным увеличением средних зимних температур воздуха, в строении снежной толщи исследуемой территории могли произойти изменения.

Основные задачи настоящей работы — сравнить измерения, значительно отстоящие во времени, оценить ожидаемые изменения, связанные с регистрируемым увеличением зимних температур воздуха на исследуемой территории, а также саму возможность такого сравнения. Проведены сравнение и обобщение использо-

ванных в описаниях стратиграфических разрезов классификаций снежного покрова, которые позволили сравнить опубликованные данные 1950–60-х годов с современными. Выполнен анализ толщины, плотности, твёрдости, формы и размера кристаллов снежной толщи и отдельных её слоёв. Проанализированы условия развития снежной толщи в периоды с начала залегания устойчивого снежного покрова до максимума снеготопливных запасов.

Район исследования

В условиях умеренно-континентального климата центральных областей Европейской территории России (ЕТР) в силу особенностей атмосферной циркуляции зимние погодные условия характеризуются немалым разнообразием. Наблюдаются значительные колебания зимних температур, количества и интенсивности осадков. Сильные снегопады часто сопровождаются ветром и повышением температуры воздуха до положительных значений. Во время метелей на открытых пространствах формируются слои ветрового уплотнения [10]. По мере промерзания снежной толщи после зимних оттепелей формируются слои таяния—замерзания и льдистые корки [11]. Во время сильных морозов интенсифицируется процесс температурно-градиентного метаморфизма и развиваются слои с огранкой вплоть до глубинной изморози. Слои таяния—замерзания, сформировавшиеся в начале зимы, к концу зимы могут потерять свои первоначальные свойства и будут сложены преимущественно крупными поликристаллами с огранкой. Результирующее строение снежной толщи отражает условия снегонакопления и процессы, происходящие в снежной толще в течение всей зимы [12–14].

По данным метеостанций (ГМС) Дмитров, Клин, Александров и Москва (ВДНХ) период с середины XX в. по настоящее время характеризуется ростом зимних температур воздуха (с ноября по март включительно) с -7 до -4 °C (рис. 1). В последние годы средняя зимняя температура воздуха достигла на исследуемой территории положительных значений. По данным ГМС Москва, с 1965 по 2015 г. сумма зимних осадков практически не изменилась, хотя

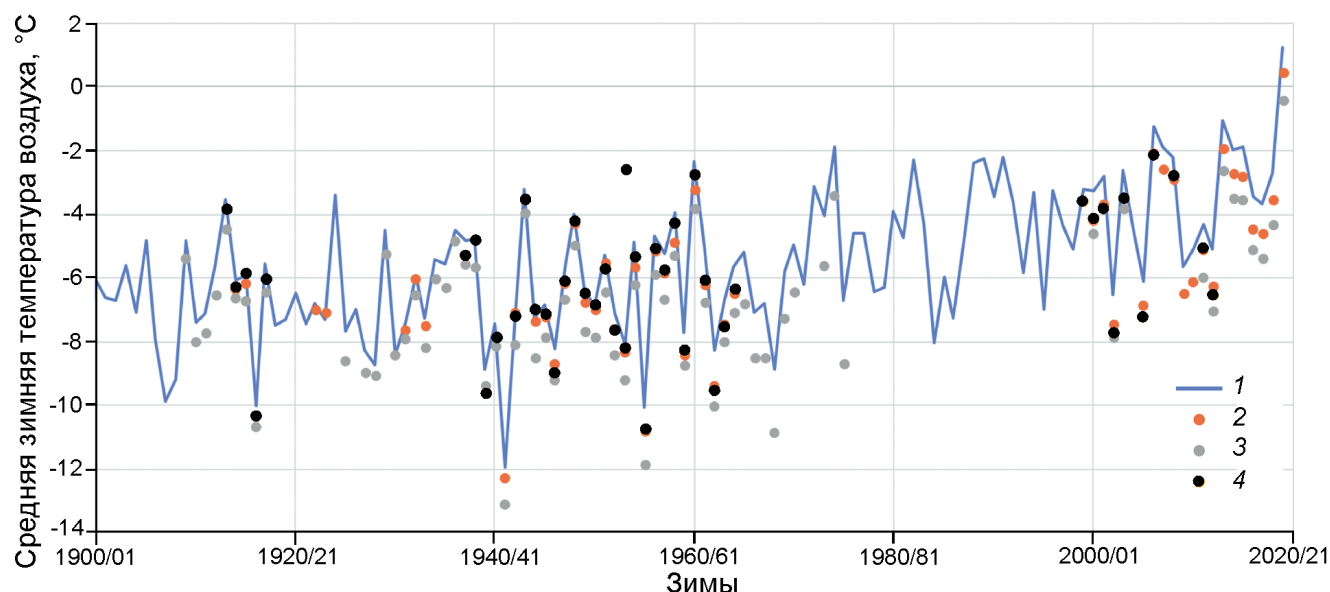


Рис. 1. Средняя зимняя (с ноября по март включительно) температура воздуха в зимы 1900/01–2020/21 гг. по данным метеостанций:

1 – Москва (ВДНХ); 2 – Дмитров; 3 – Александров; 4 – Клин; данные работ [15, 16]

Fig. 1. Average winter (November to March) air temperature for 1900/01–2020/21 winter seasons meteorological stations: 1 – at the Moscow (VDNkH); 2 – Dmitrov; 3 – Alexandrov; 4 – Klin; data: [15, 16]

доля жидких осадков увеличилась, а твёрдых – сократилась. Так, с 1950 по 1970 г. сумма осадков составила в среднем 255 мм, а за 2000–2015 гг. – 245 мм; сумма твёрдых осадков – 150 и 110 мм, а жидких – 54 и 104 мм соответственно [15, 16]. Несмотря на рост температуры, средние многолетние значения максимальной толщины (около 45 см) и продолжительности залегания снежного покрова (130 дней) практически неизменны. Большой межгодовой изменчивостью характеризуются даты установления, максимума и разрушения снежного покрова, хотя значимые тренды для этих параметров в указанный период отсутствуют. Именно такая изменчивость метеорологических параметров обуславливает различия строения и свойств снежной толщи в исследуемые годы.

Климатические классификации снежного покрова

Существующие климатические классификации снежного покрова, использующие в качестве основы метеорологические данные и характеристики снежного покрова, позволяют отнести территорию исследований к районам с умеренно тёплой зимой и периодическими зимними отте-

пелями, а также со сравнительно небольшой толщиной и продолжительностью залегания снежного покрова [3, 6]. На основе данных о толщине снежного покрова, продолжительности его залегания и особенностях климата Г.Д. Рихтер [3] построил карту районов снежного покрова СССР. Центральные области ЕТР расположены в пределах двух зон: центральной полосы Европейской территории СССР и Северо-Европейского района (рис. 2). Территория Москвы и Московской области находится на границе этих двух районов и характеризуется средними показателями. Северо-Европейский район занимает северо-восточную половину ЕТР и отличается умеренно холодными и снежными зимами.

Не менее известна и широко используется климатическая классификация снежного покрова, разработанная М. Стурмом [6]. Как показали его исследования, трёх стандартных метеорологических характеристик (температуры воздуха, скорости ветра и атмосферных осадков) достаточно, чтобы отнести снежный покров территории к одному из шести классов, отличающемуся от других особенностями строения снежного покрова, а именно: последовательностью и толщиной слоёв, их плотностью и типом кристаллов. На основе разработанного алгоритма с исполь-

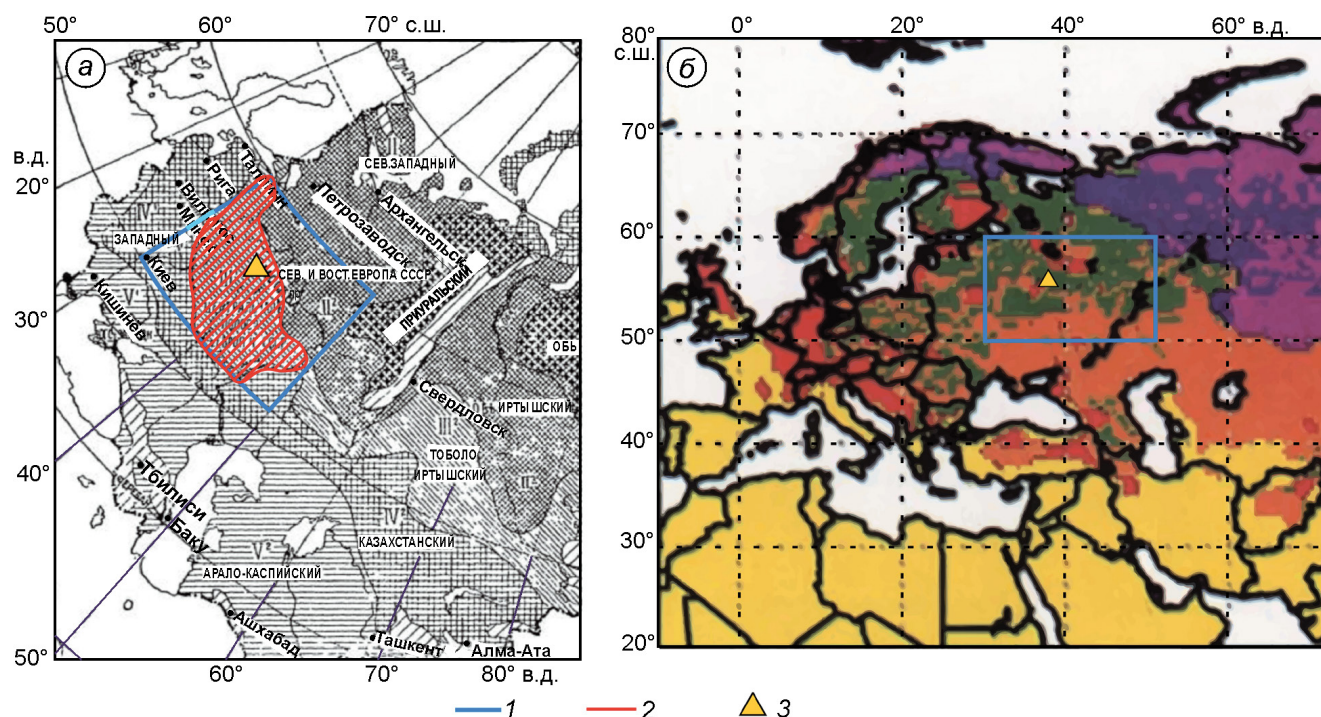


Рис. 2. Карты классов снега, выделенных на основе климатических параметров:

a – по Г.Д. Рихтеру [3]; *б* – по М. Стурму [6] (© Изображение используется с разрешения Американского метеорологического общества); 1 – границы координатной сетки от 50° с.ш. до 60° с.ш. и от 30° в.д. до 50° в.д., в пределах которых находится выделенный район; 2 – границы класса «центральная полоса Европейской территории СССР»; 3 – г. Москва.

По классификации М. Стурма, на исследуемой территории распределение классов мозаично, преобладают классы «альпийского», «морского» и «степного» снега; по классификации Г.Д. Рихтера, территория исследования относится к одному классу центральной полосы Европейской территории СССР

Fig. 2. Maps of climate snow classes based on:

a – G.D. Richter [3]; *б* – M. Sturm [6] (© American Meteorological Society. Used with permission); 1 – the border of the coordinate grid from 50° N to 60° N and from 30° E to 50° E; 2 – the boundaries of the central zone of the European territory of the USSR snow class [3]; 3 – Moscow city. According to M. Sturm's classification the distribution of classes in the study area is mosaic: «alpine», «maritime» and «steppe» snow prevail; According to G.D. Richter's classification of the study area belongs to a single «warm» central zone of the European territory of the USSR

зованием данных ГМС мира за 60-летний период была построена карта распределения классов снежного покрова для Северного полушария (см. рис. 2). Для территории Восточной Европы и центральных районов ЕТР распределение классов имеет мозаичный характер. Наблюдается чередование классов «альпийского», «морского» и «степного» снега. На картах, построенных на основе классификаций Г.Д. Рихтера и М. Стурма, территория исследования находится в пределах одного снежного района по Г.Д. Рихтеру, но относится к трём различным классам по М. Стурму (см. рис. 2). Это несоответствие связано с особенностями алгоритмов их выделения. Тем не менее, общие характеристики классов, выделенных Г.Д. Рихтером и М. Стурмом для исследуемой территории, не противоречат друг другу. Как

и Г.Д. Рихтер, М. Стурм определяет территорию центральной полосы ЕТР как зону, характеризующуюся преобладанием классов «тёплого» альпийского и морского снега. При этом оба автора отмечают, что даже в пределах одного климатического класса межгодовая изменчивость строения и свойств снега может быть высокой.

Анализ современных метеорологических данных показывает значительные изменения температуры воздуха, произошедшие за последние десятилетия. Поскольку карты снежного покрова были построены Г.Д. Рихтером на основе данных до 1945 г., а М. Стурмом – на основе данных за период с 1950-х по 1995 г., последующие возможные изменения границ районов, связанные с наблюдаемыми климатическими изменениями, на них не отражены. Снежный покров изучаемой

нами территории мог стать более «тёплым», т.е. содержать большее количество льдистых включений и корок, свидетельствующих об интенсификации зимних оттепелей.

Изученность строения снежного покрова в районе исследования

Несмотря на сравнительно высокую плотность ГМС в пределах центральных районов ЕТР, изучение параметров снежного покрова было ограничено измерением его толщины, плотности и продолжительности залегания. Изучению строения снежной толщи и её пространственно-временной изменчивости уделялось меньше внимания, поскольку такие измерения требуют больших трудозатрат и не входят в программу обязательных измерений на метеостанциях и постах. Стратиграфические исследования снежного покрова на северо-востоке Московской области проводили редко, они не были систематическими и ограничивались данными, полученными А.В. Павловым и А.Н. Формозовым в 1957/58 и 1961/62 гг. А.Н. Формозов [7] изучал строение и свойства снежного покрова в Сергиево-Посадском районе (станции Софрино и Зеленоградская) на протяжении 24 лет — с 1946 по 1972 г. Исследования предусматривали измерение толщины снега и проводились еженедельно, но имели они преимущественно описательный характер. Несмотря на обилие информации о характере аккумуляции, залегании снежной толщи и наличии в ней корок, подробное описание строения снежной толщи было выполнено лишь зимой 1961/62 г.

В период с 1957 по 1959 г. А.В. Павлов [8] провёл под Загорском (сейчас Сергиев Посад) ряд экспериментов по изучению теплофизических свойств снега. Помимо прочего, они включали в себя исследование строения снежного покрова, её плотности и изменчивости в течение зимнего сезона на открытом участке. Согласно А.Н. Павлову, несмотря на повышенную толщину снега зимой 1957/58 г., характеристики снежного покрова были типичны для исследуемой территории [9, с. 22], а метеорологические показатели этой зимы соответствовали средним многолетним за период с 1914 по 1950 г. (по данным ГМС Дмитров).

Полевые исследования

Изучение современного строения снежной толщи выполнялось в течение пяти лет с 2014 по 2019 г. на ровном задернованном участке по аналогии с предшествующими исследованиями. Участок исследования представляет собой пойменную поляну размером 35×30 м (56°14'55" с.ш., 37°59'55" в.д.), окружённую ивами высотой от 10 до 20 м. С северо-западной стороны поляны переходит в склон надпойменной террасы. С юго-восточной стороны расположена р. Пажа. Снег на данном участке аккумулируется в спокойных безветренных условиях. Микрорельеф поверхности сформирован кочками травы высотой от 5 до 15 см. Строение снежной толщи изучалось в периоды максимума снеготопливных запасов в одной и той же точке в центральной части поляны. Под периодом максимума снеготопливных запасов в данной работе мы понимаем период с максимальными запасами воды в толще, поскольку, как показывают результаты измерений, максимальные снеготопливные запасы могут наблюдаться значительно позже даты максимальной толщины снежной толщи. Это происходит в результате быстрого оседания и уплотнения снежной толщи и при условии продолжающейся аккумуляции снега после этой даты.

Измерение толщины, плотности, водозапаса снежной толщи и её отдельных слоёв проводили в шурфах шириной 1–2 м каждые 5–10 дней. Точность определения толщины слоёв — около 1 см. Затем подробно описывалось строение снежной толщи, предусматривающее, в соответствии с Международной классификацией для сезонно-выпадающего снега [5], информацию о форме и размере зёрен, плотности, твёрдости и характере залегания слоёв. Плотность слоёв измеряли при помощи ручного плотномера с прямоугольным сечением. Особые сложности возникали при измерении плотности льдистых корок и слоёв глубинной изморози. Ввиду их высокой хрупкости точность значений, полученных при помощи ручного плотномера, может быть невысокой. Формы и размеры кристаллов снега исследовали с использованием снегомерной палетки с размером ячейки 1 и 2 мм. Твёрдость снега измеряли ручным методом, в результате которого получены безразмерные ручные индексы твёрдости. Твёрдость слоёв снега на

Таблица 1. Схема приведения классификаций к единым показателям*

По классификации Г.Д. Рихтера [3]	По Международной классификации [5]	Общие классы	Характеристика классов	Плотность, кг/м ³	Размер кристаллов, мм	Твёрдость, ручной индекс
Свежевыпавший	Свежевыпавший	Осевший	Рыхлый и сухой свежевыпавший и осевший мелкозернистый снег низкой плотности и твёрдости	80–300	0–1	1–3
	Разрушенные снежинки					
Уплотнённый лежалый	Округлые зёрна					
	Ветровая упаковка					
Молодой фирнизованный	Округлые частицы с гранями	С огранкой	Средне- и крупнозернистый снег с чёткой огранкой и глубинная изморозь	160–320	1–5	2–3
Старый фирнизованный	Огранённые кристаллы					
Снег плавун (глубинный иней)	Глубинная изморозь					
Корки оттепелей	Корки таяния–замерзания	Слои таяния–замерзания	Смёрзшиеся поликристаллы, корки и включения типа линз и пальцев просачивания высокой плотности и твёрдости	350–700	2–3	4
	Округлённые поликристаллы			200–400		3–4

*Плотность, размер кристаллов и твёрдость приводятся по данным полевых измерений 2014–2019 гг.

даты исследования изменялась от 1 (очень рыхлый, 0–50 Н по зонду Хефели) до 4 (твёрдый, 390–750 Н по зонду Хефели) [5]. За период 2014–2019 гг. было выполнено 66 серий измерений. На основе полученных данных построены и проанализированы схемы строения снежной толщи в периоды максимума снегозапасов.

Методология сравнения стратиграфических колонок

Стратиграфические разрезы описывали на основе Международной классификации снежного покрова [5]. Затем полученные данные сравнивали с результатами исследований А.В. Павлова и А.Н. Формозова, которые, в свою очередь, выполнялись на основе классификации Г.Д. Рихтера [3]. В основу этих классификаций положены разные принципы, однако сравнение их возможно (табл. 1). В классификации Г.Д. Рихтера используется ограниченное число классов, выделенных на основе информации о плотности, размере и морфологических особенностях кристаллов снега. Международная классификация оперирует значительно большим числом классов и подклассов снега, выделенных преимущественно на основе анализа морфологии кристаллов и условий их метаморфизма.

В работе использовалось два подхода для сравнения стратиграфических разрезов снежной толщи, выполненных на основе разных классификаций. Для определения пропорций, занимаемых разными классами снега в разные годы, и оценки их изменчивости имеющиеся классификации были приведены к общим показателям методом группировки всех классов снега, наблюдаемых в шурфах, по трём группам: 1) свежего и осевшего мелко- и среднезернистого снега; 2) смёрзшегося крупнозернистого снега и льдистых корок; 3) средне- и крупнозернистого снега с огранкой и глубинной изморози. Выделенные группы представляют собой синтез классов, представленных в классификациях, и объединяют информацию о форме, размере, типе и характере метаморфизма кристаллов (см. табл. 1). Другой подход для оценки возможных изменений строения снежной толщи был основан на детальном анализе пространственного положения слоёв, их толщины и последовательности отложений. Для этого все имеющиеся описания были приведены в соответствие с Международной классификацией снежного покрова [5].

Используемые подходы применимы для оценки изменений, происходящих в снежной толще в течение года, межгодовой и многолетней изменчивости, связанной с климатическими изменениями, поскольку, как было показано

Таблица 2. Значения метеорологических параметров за период от начала залегания устойчивого снежного покрова до максимума снегозапасов в годы исследования*

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1957/58	117	+9	7	4	–753	111	–429	29	0,51	11	32
1961/62	120	+30	18	7	–734	102	–369	24	0,46	12	26
2014/15	77	+26	20	6	–334	57	–150	11	0,71	11	15
2015/16	70	+25	22	8	–386	48	–284	21	0,82	18	21
2016/17	93	+8	8	4	–448	80	–268	17	0,5	20	41
2017/18	68	+1	1	1	–500	67	–218	17	0,5	14	26
2018/19	92	+15	14	10	–447	79	–137	11	0,54	16	30

*Продолжительность периода от начала залегания устойчивого снежного покрова до максимума снегозапасов (II, дни); сумма положительных температур воздуха за указанный период (III, °C); число дней с оттепелями (IV, дни); число оттепелей (V); сумма отрицательных температур воздуха (VI, °C); число дней с отрицательной температурой воздуха (VII, дни); сумма температур ниже –10 °C (VIII, °C); число дней с температурой ниже –10 °C (IX, °C); средние значения (X, °C) и суммы (XI, °C) температурных градиентов в снежной толще больше 0,25 °C/см; число дней (XII, дни) с градиентами больше 0,25 °C/см за период от начала залегания устойчивого снежного покрова до максимума снегозапасов в зимы исследования (I). Для расчёта параметров III–XII использованы среднесуточные значения температур воздуха.

М. Стурмом [7], увеличение зимних температур может влиять на соотношение слоёв, представленных разными типами снега. Так, увеличение числа, продолжительности и интенсивности оттепелей может привести к росту числа смёрзшихся слоёв и корок. При этом число и толщина слоёв с огранкой и глубинной изморози могут сократиться вслед за уменьшением интенсивности температурно-градиентного метаморфизма. В долгосрочной перспективе повышение зимних температур воздуха может вызвать значительное изменение строения и свойств снежной толщи исследуемой территории, а также смену климатического класса снежного покрова от более холодного к более тёплому: от «альпийского» к «морскому» и «неустойчивому», более характерному для западных районов, в частности, для территории Центральной Европы.

Полученные результаты

Погодные условия и эволюция снежной толщи в годы исследования. Различия в строении снежной толщи в разные годы обусловлены значительно разными погодными условиями за период от начала установления устойчивого снежного покрова до максимума снегозапасов (который, как правило, наблюдается непосредственно перед началом весеннего снеготаяния). По данным ГМС Москва (ВДНХ), в зимы 2014–2019 гг. число дней со среднесуточной положительной температурой воздуха и сумма среднесуточных положительных темпера-

тур за указанный период возросли по сравнению с зимами 1957/58 и 1961/62 гг. (табл. 2). Число оттепелей (рассчитанное как число периодов со среднесуточной температурой воздуха, не опускающейся ниже 0 °C) и их средняя продолжительность были больше в последние годы. В то же время аналогичная сумма отрицательных температур, число дней с отрицательными температурами и продолжительность залегания устойчивого снежного покрова до максимума снегозапасов оказались значительно меньше.

Средние значения температурных градиентов рассчитаны как разность между температурой на поверхности грунта и температурой воздуха, делённая на высоту снежной толщи в сантиметрах. Отдельные проведённые измерения показали, что температура на поверхности грунта под снегом, как правило, отрицательна, но близка к 0 °C и грунт находится в мёрзлом состоянии. Об этом же свидетельствуют данные, полученные А.П. Павловым зимой 1957/58 г. [8]. Поскольку температура на поверхности грунта систематически в рамках данного исследования не измерялась, она была принята за 0 °C. Анализ осреднённых по высоте градиентов температуры в снежной толще показал, что, несмотря на значительно более суровые и продолжительные морозы в 1957/58 и 1961/62 гг., их значения не сильно отличались от современных, что, в частности, обусловлено меньшей высотой снежной толщи в зимы 2014–2019 гг. Принимая за граничные значения начала развития кристаллов глубинной изморози температурный градиент 0,25 °C/см [17], установ-

лено, что в современный период суммы градиентов, превышающих $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{см}$, оказываются даже больше, чем в 1957/58 и 1961/62 гг. Правда, более частые и продолжительные оттепели нивелируют возможный эффект повышенного развития слоёв с огранкой и глубинной изморози.

Зимы 1957/58 и 1961/62 гг. были продолжительными, холодными и многоснежными, а оттепелей почти не наблюдалось, поэтому к периоду максимальных снегозапасов снежная толща была сложена преимущественно слоями снега с огранкой и осевшего рыхлого снега. Слои таяния—замерзания, сформировавшиеся в начале периода залегания устойчивого снежного покрова, претерпели в течение зимы значительные изменения ввиду активного температурно-градиентного метаморфизма и к периоду максимума снегозапасов представляли собой слои плотного крупнозернистого снега с огранкой и кристаллами глубинной изморози. Зимы 2014–2019 гг. отличались повышенными температурами воздуха, числом и продолжительностью оттепелей. Сумма температур воздуха ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и число дней с соответствующей температурой в 1957/58 и 1961/62 гг. оказались почти вдвое больше, чем в современный период. В последние годы зимние погодные условия отличались большим разнообразием, поэтому строение снежных толщ в эти годы сильно различалось. Большую роль играли не только средние за исследуемые периоды значения метеорологических величин, но и последовательность погодных условий: оттепелей и морозов.

Несмотря на похожие значения метеорологических параметров тёплых зим 2014/15 и 2015/16 гг., строение снежной толщи на период максимальных снегозапасов отличалось. Зимой 2015/16 г. сильная и продолжительная оттепель, наблюдавшаяся в конце января — начале февраля, привела формированию в верхней части толщи слоёв таяния—замерзания и корок, а также к оплавлению кристаллов глубинной изморози и замедлению их последующего роста, в то время как зимой 2014/15 г. развитие слоёв с огранкой и глубинной изморози продолжалось вплоть до начала марта. К периоду максимума аккумуляции 2014/15 г. слой таяния—замерзания, сформировавшийся в декабре, оказался в значительной мере разрыхлён в результате интенсивного температурно-градиентного метаморфизма в последующие месяцы.

Зима 2016/17 г. была холодной и снежной, однако серия оттепелей в конце декабря привела к формированию мощного слоя таяния—замерзания, который сохранялся в толще вплоть до максимума снегозапасов, несмотря на значительные температурные градиенты в толще в последующий период. Следующий зимний период — 2017/18 г.— сильно отличался от предыдущих. Устойчивые положительные температуры воздуха наблюдались вплоть до середины января, поэтому окончательный снежный покров сформировался только 8 января 2018 г. С этого периода установилась холодная погода с частыми и сильными снегопадами, в то время как оттепели практически отсутствовали вплоть до максимума снегозапасов. В результате сформировалась толща, в наибольшей степени похожая на описанные А.П. Павловым и А.Н. Формозовым. Преобладали слои осевшего снега и слои с огранкой, а слои таяния—замерзания и корки практически полностью отсутствовали.

Первая половина зимы 2018/19 г. характеризовалась холодной погодой и почти полным отсутствием оттепелей. Уже к середине января в нижней части толщи сформировались слои с огранкой и глубинной изморози. Однако с конца января повторяемость оттепелей увеличилась и в верхней части толщи сформировались слои таяния—замерзания и корки небольшой мощности. Слои с огранкой в нижней части толщи оплавлились, но сохранили зернистую структуру.

Таким образом, зимы 1957/58, 1961/62 и 2014–2019 гг. значительно отличались по своим погодным условиям и значениям метеорологических параметров (см. табл. 2), что привело к стратиграфическим различиям снежной толщи. Но даже в годы с похожими значениями метеорологических параметров (осреднённых за периоды с начала залегания устойчивого снежного покрова до максимума снегозапасов) строение снежной толщи сильно отличалось, что обусловлено, в первую очередь, различиями в последовательности, интенсивности и продолжительности снегопадов, оттепелей и морозов. Обобщённые показатели погодных условий (см. табл. 2) неоднозначно характеризуют структуру снежной толщи, поскольку корректно она может быть описана лишь с помощью физически обоснованных моделей, в которых входной является детальная информация о погоде.

Таблица 3. Характеристики снежного покрова в годы исследования*

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
1957/58	23.11.1957	20.03.1958	20.04.1958	148	204*	72	305	220	17	7	10	36	54
1961/62	10.11.1961	10.03.1962	15.04.1962	156	251	64	—	—	9	3	7	28	65
2014/15	04.12.2014	19.02.2015	08.04.2015	125	200	48	180	90	13	5	13	42	46
2015/16	28.12.2015	07.03.2016	09.04.2016	103	289	51	290	122	14	5	31	25	43
2016/17	27.10.2016	28.01.2017	07.04.2017	162	274	53	270	143	17	6	19	38	43
2017/18	14.11.2017	17.03.2018	11.04.2018	148	292	60	195	120	10	3	5	55	40
2018/19	01.12.2018	03.03.2019	07.04.2019	127	212	60	240	145	11	3	17	17	67

*Даты установления (II), максимума (III), схода (IV) и продолжительности залегания (V, дни) устойчивого снежного покрова; сумма осадков за зимний период (с ноября по март, дана без учёта погрешностей осадкомерного прибора) (VI, мм); значения высоты снежного покрова (VII, см), его плотности (VIII, кг/м³), водозапаса (IX, мм), числа слоёв (X), ледяных корок (XI); пропорции слоёв таяния—замерзания (XII, %), слоёв осевшего снега (XIII, %), слоёв с огранкой и глубинной изморози (XIV, %) в годы исследований (I).

Строение и свойства снежной толщи. Значения высоты, плотности, продолжительности залегания и других параметров снежной толщи в годы исследований представлены в табл. 3. По данным наблюдений 2014–2019 гг. толщина снежного покрова на период максимума аккумуляции составила от 48 до 60 см при среднем значении около 55 см. Продолжительность залегания снежного покрова в годы исследований составляла от 103 до 162 дней при среднем значении около 130 дней, что соответствует средним многолетним значениям для исследуемой территории. Средневзвешенная плотность толщи в период максимума снеготопливных запасов менялась от 180 до 290 кг/м³ (в среднем 235 кг/м³), запасов воды в снеге — от 90 до 145 мм (в среднем 125 мм). Даты установления, максимума и разрушения снежного покрова менялись в широких пределах, но, как и в 1950–60 годы, даты с максимальными запасами воды в снеге приходились в среднем на первую декаду марта.

Строение снежной толщи на территории исследования отличалось большим разнообразием слоёв и их свойств. В разные зимы было выделено от 10 до 17 слоёв, из них от трёх до шести корок оттепелей. При этом наибольшее число слоёв и корок наблюдается в зимы с максимальными суммами положительных температур за зиму. Осреднённые за 1957/58 и 1961/62 (2 года) и за 2014–2019 гг. (5 лет) данные показывают некоторые отличия в соотношении слоёв снега разного типа на максимум снеготопливных запасов в 1950-е и 2010-е годы (рис. 3). Слои таяния—замерзания занимали в среднем за две зимы 1957/58 и 1961/62 гг. около 8%, осевшего

снега — около 32% и огранённых кристаллов — около 60%. При этом осреднённые за пятилетний период, с 2014 по 2019 г., слои, сложенные этими классами снега, занимали в среднем 17, 35 и 48% соответственно. Как правило, число и толщина слоёв таяния—замерзания увеличиваются за счёт сокращения толщины слоёв снега с огранкой, в то время как пропорции слоёв осевшего снега сохранялись относительно неизменными.

Межгодовая изменчивость строения снежной толщи за пятилетний период современных исследований оказалась очень большой. Так, смёрзшиеся слои таяния—замерзания занимали в годы исследования от 5 до 31% толщи, слои с огранкой — 43–67%, слои рыхлого осевшего снега без огранки — от 17 до 55%, что согласуется со значениями, полученным в других районах Подмосковья Р.А. Черновым в 2001–2011 гг. [18]. Анализ более детализированных схем, построенных в соответствии с Международной классификацией [5], позволил оценить изменения пространственного положения слоёв разных типов в толще (рис. 4). Несмотря на относительно небольшие изменения пропорций слоёв снега в 1950–60-е и 2010-е годы, их пространственное положение в толще отличается.

Погодные условия зим 1958/59 и 1961/62 гг. были охарактеризованы А.В. Павловым как типичные для среднеевропейских условий исследуемой территории [9, с. 22], строение снежной толщи также может считаться репрезентативным для климатических условий того времени. В эти годы строение снежной толщи отличалось преобладанием слоёв крупнозернистого снега с огранкой и глубинной изморози в средней части

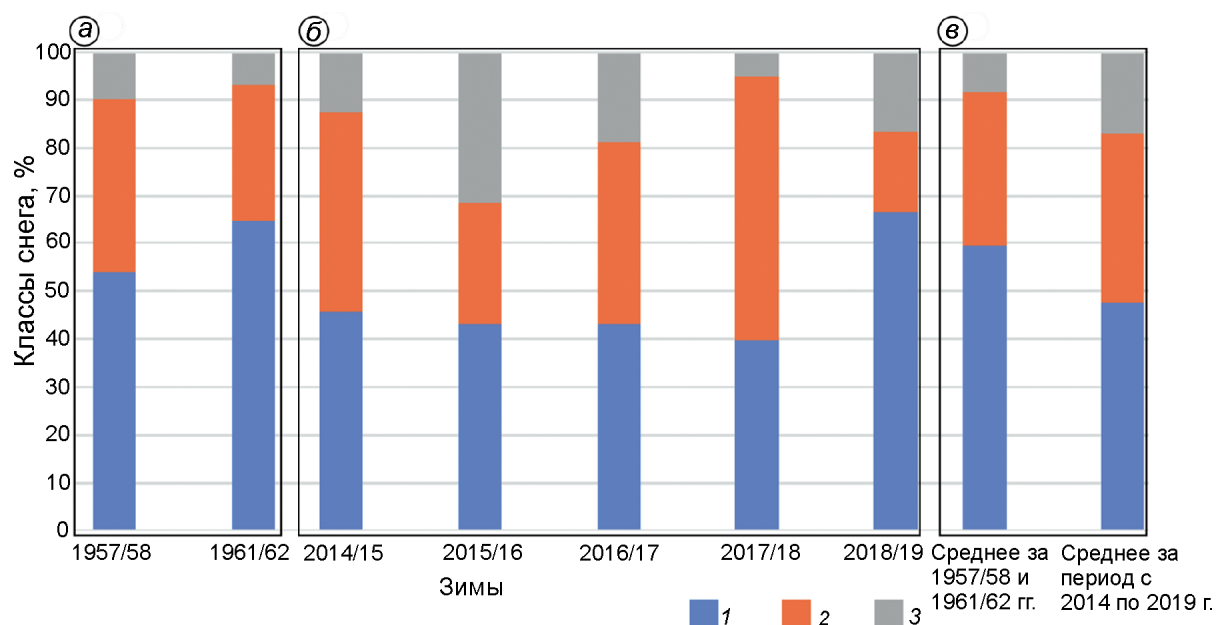


Рис. 3 Процентное соотношение слоёв снега с огранкой и глубинной изморози (1), осевшего снега (2), таяния–замерзания и ледяных корок (3) в снежной толще на открытых участках в период максимальных снегозапасов: а – в зимы 1957/58 г. (по А.В. Павлову [8]) и 1961/62 г. (по А.П. Формозову [7]); б – в зимы 2014–2019 гг. по данным полевых измерений автора; в – осреднённые за зимы 1957/58 и 1961/62 гг. и за период с 2014 по 2019 г.

Fig. 3. Proportions of faceted and depth hoar crystals (1), rounded grains (2), melt-freeze layers and ice crust (3) in snow cover at open meadows during the maximum snow accumulation:

а – winters 1957/58 (A.V. Pavlov [8]) and 1961/62 (A.P. Formozov [7]); б – winters 2014–2019 (author's field measurements); в – 1957/58 and 1961/62 averaged, and 2014–2019 averaged

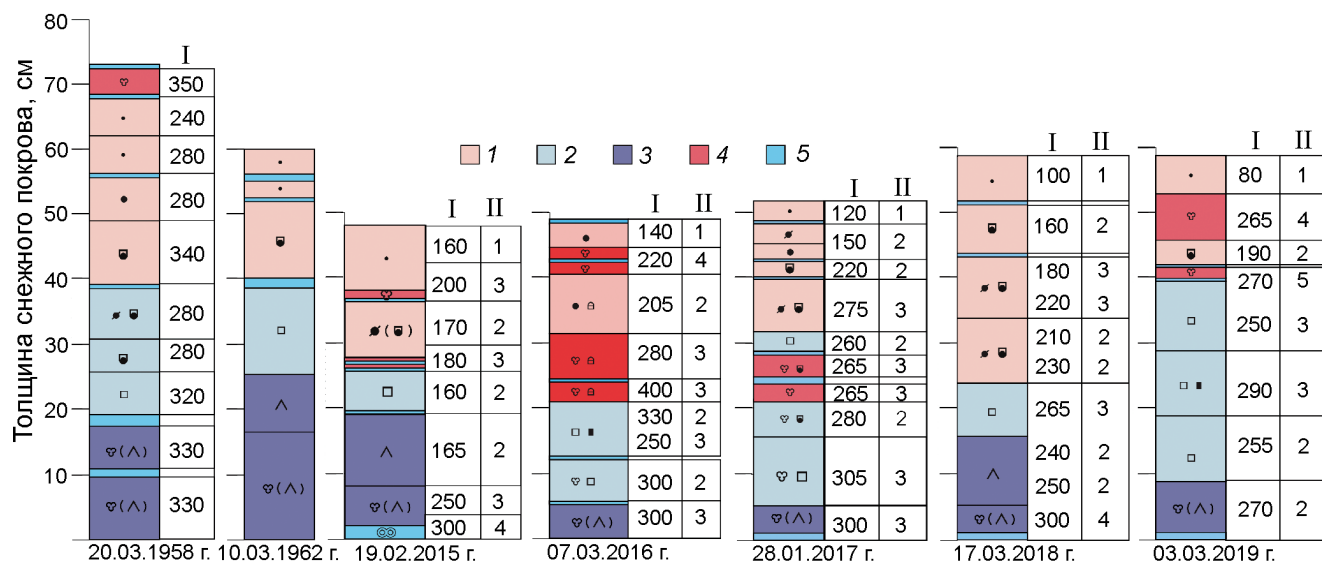


Рис. 4. Строение снежного покрова на открытых участках в период максимальных снегозапасов в зимы 1957/58, 1961/62 и 2014–2019 гг.

I – средняя плотность снега, кг/м³; II – твёрдость снега (ручной индекс прочности по [5]).

Цветовые обозначения: 1 – свежесыпавший и осевший снег без огранки; 2 – слои с огранкой; 3 – глубинная изморозь; 4 – слои таяния–замерзания; 5 – ледяные корки. Символы и условные обозначения соответствуют данным работы [5]

Fig. 4. Snow structure at open meadows during the maximum snow accumulation in winters 1957/58, 1961/62, 2014–2019.

I – average snow density, kg/m³; II – snow hardness (hand hardness index according to [5]).

Color code: 1 – settled snow; 2 – faceted crystals; 3 – depth hoar; 4 – melting–freezing layers; 5 – ice crusts. Symbols correspond to [5]

толщи и рыхлого осевшего снега, перемежающегося с корочками весенних оттепелей в верхней части толщи. Нижняя часть толщи отличалась наличием достаточно мощного, от 5 до 20 см, слоя таяния—замерзания, сформировавшегося в начале зимнего сезона и практически полностью перешедшего в слой крупной глубинной изморози в результате интенсивного температурно-градиентного метаморфизма. В средней части корки оттепелей были редкими и тонкими — не более 2 см. Несмотря на различия в осреднённых значениях метеорологических параметров в 1958/59 и 1961/62 гг., похожее строение и свойства снежной толщи были обусловлены продолжительными (более двух месяцев) периодами холодной погоды без оттепелей, с сильными снегопадами, которые наблюдались в оба года.

В период с 2014 по 2019 г. только зимой 2017/18 г. снежная толща имела строение, аналогичное описанному А.В. Павловым и А.Н. Формозовым для зим 1958/59 и 1961/62 гг. В остальные зимы значительно большее развитие получили слои таяния—замерзания повышенной твёрдости (3—4) и плотности (200—400 кг/м³) в центральной части толщи, которые практически не наблюдались в 1957/58, 1961/62 и 2017/18 гг. Как правило, эти слои формировались в результате сильных оттепелей в январе и феврале и достигали толщины 5—10 см. Таким образом, строение снежной толщи в 2017/18 г., соответствующее описанию А.В. Павлова [8, 9], не может в полной мере характеризовать снежную толщу за последние пять лет, несмотря на то, что осреднённые за период пропорции основных классов снега в целом сохраняются. Характерная черта для всех полученных нами стратиграфических разрезов — наличие плотного и твёрдого слоя таяния—замерзания в нижней части толщи, который затем значительно разрыхлялся и к периоду максимальных снегозапасов переходил в слой глубинной изморози.

Обсуждение результатов

Сравнение метеорологических показателей 1950-х и 2010-х годов показывает значительные изменения зимней температуры воздуха. В результате стратиграфия снежной толщи в разные годы также была разной. В целом, в толще преобладали слои рыхлого осевшего снега, слои с огранкой и

глубинной изморози, а также слои таяния—замерзания, что согласуется с результатами наблюдений на юге Подмоскovie 2001—2010 гг. [16].

Сравнение стратиграфических описаний снежной толщи, выполненных на основе значительно отличающихся классификаций, использующих разные принципы выделения классов снега, оказалось возможным, но несколько субъективным. Поскольку классификации Г.Д. Рихтера и Международная классификация отличаются по степени детализированности, могут возникать неточности, связанные с переходом от менее подробной классификации к более подробной. Например, слои «старого» снега в классификации Г.Д. Рихтера содержат как слои с огранкой, подверженные температурно-градиентному метаморфизму, так и слои таяния—замерзания. Анализ пространственного положения слоёв, выделенных на основе Международной классификации, позволяет провести более детальную оценку по сравнению с классификацией Г.Д. Рихтера и точнее оценить изменения пространственного положения слоёв различных классов в снежной толще.

Лимитирующий фактор данного исследования — весьма ограниченный набор исторических данных о строении снежной толщи исследуемого района. Анализ изменчивости высоты снежной толщи в течение зимних периодов и наличия в толще корок, выполненный по данным многолетних наблюдений А.Н. Формозова [7], показывает, что в отдельные зимы (1946/47, 1951/52, 1967/68 гг. и др.) формировались слои таяния—замерзания, крупные (до 5—6 см) корки и серии корок, в том числе и в средней части толщи. Таким образом, строение снежной толщи в районе исследования отличалось большой межгодовой изменчивостью, что наблюдается и в современный период. Это соответствует представлениям М. Стурма о значительной изменчивости строения снежной толщи в пределах одного климатического класса снега.

Дальнейшее потепление климата может увеличить повторяемость тёплых зим с частыми оттепелями, сократить продолжительность залегания устойчивого снежного покрова и уменьшить его высоту. Возможен рост толщины слоёв таяния—замерзания и льдистых корок по отношению к слоям с огранкой, глубинной изморози и осевшего рыхлого сухого снега. Также возможны повышение твёрдости снега и снижение теплоизоляционных свойств. Однако бо́льшая меж-

и внутригодовая изменчивость будет и дальше иметь ключевое значения для строения и свойств снежного покрова исследуемой территории. Отметим, что пространственная изменчивость строения снежной толщи может иметь важное значение при сравнении разрезов, поскольку описания, выполненные в разных точках ландшафта, даже расположенных на расстоянии первых метров друг от друга, могут сильно варьировать. Так, толщина отдельных слоёв может отличаться в несколько раз, а на ряде участков некоторые слои могут и вовсе отсутствовать [19, 20].

Выводы

Впервые выполнено сравнение стратиграфических разрезов снежной толщи исследуемой территории, описанных на основе разных классификаций и характеризующих снежную толщу в периоды 1950-х и 2010-х годов, значительно отличающихся по своим климатическим показателям. Сравнение описаний по Международной классификации снежного покрова и классификации Г.Д. Рихтера оказалось возможным, хотя и с некоторыми ограничениями. Сравнительный анализ строения снежной толщи в эти периоды показал, что в последние годы наблюдается увеличение доли слоёв таяния—замерзания по сравнению с измерениями на аналогичных участках в 1957/58 и 1961/62 гг. Доля слоёв снега с ограниченной и глубинной изморози несколько уменьшается, а доля слоёв рыхлого осевшего снега сохраняется относительно неизменной.

Не нарушается большая меж- и внутригодовая изменчивость зимних погодных условий, которая оказывает на строение снежной толщи большее

влияние, чем многолетние климатические тренды. Ключевую роль играют не только средние за исследуемые периоды значения метеорологических величин, но и последовательность погодных условий: оттепелей и морозов. Анализ более детализированных описаний стратиграфических разрезов позволил сравнить пространственное положение слоёв в толще и установить, что за пять лет современных наблюдений строение, аналогичное описанному А.В. Павловым и А.Н. Формозовым, наблюдалось лишь один год из пяти. В остальные годы значительно большее развитие получили слои таяния—замерзания и корки в средней части толщи, сформировавшиеся во время оттепелей в январе и феврале. Таким образом, строение снежной толщи, описанное А.В. Павловым и А.Н. Формозовым для зим 1957/58 и 1961/62 гг. и охарактеризованное ими как типичное для климатических условий того времени, не может считаться репрезентативным для периода с 2014 по 2019 г.

Благодарности. Автор выражает благодарность С.А. Сократову и Ю.Г. Селиверстову за ценные конструктивные замечания, позволившие существенно улучшить рукопись. Работа выполнена в рамках государственного задания географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова по теме «Опасность и риск природных процессов и явлений».

Acknowledgments. The author is grateful to S.A. Sokratov and Yu.G. Seliverstov for valuable constructive comments, which made it possible to significantly improve the manuscript. The work was performed in the frame of the Federal assignment of the Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, research theme «Dangers and risks of natural hazards».

Литература

1. Pielmeier C., Schneebeli M. Developments in the stratigraphy of snow // *Surveys in geophysics*. 2003. V. 24. № 5—6. P. 389—416. doi: 10.1023/B:GEOP.0000006073.25155.b0.
2. Сократов С.А., Трошкина Е.С. Развитие структурно-стратиграфических исследований снежного покрова // МГИ. 2009. Вып. 107. С. 103—109.
3. Рихтер Г.Д. Снежный покров, его формирование и свойства. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1945. 120 с.
4. Кузьмин П.П. Формирование снежного покрова и методы определения снегозапасов. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 171 с.

References

1. Pielmeier C., Schneebeli M. Developments in the stratigraphy of snow. *Surveys in geophysics*. 2003, 24 (5—6): 389—416. doi.org/10.1023/B:GEOP.0000006073.25155.b0.
2. Sokratov S.A., Troshkina E.S. Development of structural and stratigraphic studies of snow cover. *Materialy glyaciologicheskij issledovanij*. Data of Glaciological Studies. 2009, 107: 103—109. [In Russian].
3. Rikhter G.D. *Snezhny pokrov, ego formirovanie i svoistva*. Snow cover, its formation and properties. Moscow—Leningrad: Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1945: 120 p. [In Russian].

5. Фирц Ш., Армстронг Р.Л., Дюран И., Этхеви П., Грин И., МакКланг Д.М., Нишимура К., Сатьявали П.К., Сократов С.А. Международная классификация для сезонно-выпадающего снега (руководство к описанию снежной толщи и снежного покрова). Русское издание (Материалы гляциологических исследований, 2012–2). М.: ИГ РАН, Гляциологическая ассоциация, 2012. 80 с.
6. Sturm M., Holmgren J., Liston G.E. A seasonal snow cover classification system for local to global applications // *Journ. of Climate*. 1995. V. 8. № 5. P. 1261–1283. doi: 10.1175/1520-0442(1995)008<1261:ASSCCS>2.0.CO;2.
7. Формозов А.Н. Снежный покров как фактор среды, его значение в жизни млекопитающих и птиц СССР. М.: Изд-во МГУ, 1990. 287 с.
8. Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 286 с.
9. Павлов А.В. Теплофизические свойства и тепловой баланс снежного покрова в Подмоскowie // Теплофизические вопросы геофизиологии (Материалы к основам учения о мерзлых зонах земной коры. Вып. VIII). М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 3–35.
10. Дюнин А.К. Механика метелей. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963. 378 с.
11. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 348 с.
12. Сосновский А.В., Осокин Н.И., Черняков Г.А. Динамика снегозапасов на равнинной территории России в лесу и в поле при климатических изменениях // *Лёд и Снег*. 2018. Т. 58. № 2. С. 183–190. doi: 10.15356/2076-6734-2018-2-183-190.
13. Осокин Н.И., Сосновский А.В. Пространственная и временная изменчивость толщины и плотности снежного покрова на территории России // *Лёд и Снег*. 2014. № 4 (128). С. 72–80. doi: 10.15356/2076-6734-2014-4-72-80.
14. Голубев В.Н., Петрушина М.Н., Фролов Д.М. Межгодовые вариации строения снежного покрова на территории России. // *Вестн. МГУ. Сер. 5. География*. 2009. № 3. С. 16–25.
15. Электронный ресурс <http://meteo.ru/>.
16. Электронный ресурс <https://rp5.ru/>.
17. Akitaya E. Studies on depth hoar // *Contributions from the Institute of Low Temperature Science*. 1974. Т. 26. С. 1–67.
18. Чернов Р.А. Экспериментальное определение эффективной теплопроводности глубинной изморози // *Лёд и Снег*. 2013. № 3 (123). С. 71–77. doi: 10.15356/2076-6734-2013-3-71-77.
19. Комаров А.Ю., Селиверстов Ю.Г., Гребенников П.Б., Сократов С.А. Пространственно-временная неоднородность снежной толщи по данным пенетromетра SnowMicroPen // *Лёд и Снег*. 2018. Т. 58. № 4. С. 473–485. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-473-485.
20. 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 // *Journ. of Hydrology and Hydromechanics*. 2019. Т. 67. № 1. С. 110–112. doi: 10.2478/johh-2018-0016.
4. Kuz'min P.P. Snow Cover and Snow Reserves. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translation, 1963: 140 p.
5. Fierz C., Armstrong R.L., Durand Y., Etchevers P., Green E., McClung D.M., Nishimura K., Satyawali P.K., Sokratov S.A. The International Classification for Seasonal Snow on the Ground (IHP-VII Technical Documents in Hydrology № 83; IACS Contribution № 1). Paris: UNESCO–IHP, 2009: 80 p.
6. Sturm M., Holmgren J., Liston G.E. A seasonal snow cover classification system for local to global applications. *Journ. of Climate*. 1995, 8 (5): 1261–1283. doi: 10.1175/1520-0442(1995)008<1261:ASSCCS>2.0.CO;2.
7. Formozov A.N. *Snezhnyi pokrov kak faktor sredy, ego znachenie v zhizni mlekopitayushchikh i ptits SSSR*. Snow cover as a factor of the environment, its role in the life of mammals and birds of the USSR. Moscow: Moscow State University, 1990: 287 p. [In Russian].
8. Pavlov A.V. *Teplofizika landshaftov*. Thermophysics of landscapes. Novosibirsk: Nauka, 1979: 286 p. [In Russian].
9. Pavlov A.V. Thermophysical properties and thermal balance of snow cover in the Moscow region. *Teplofizicheskie voprosy geokriologii (Materialy k osnovam ucheniya o merzlykh zonakh zemnoi kory. V. VIII)*. Thermophysical problems of geocryology (Materials for the foundations of the doctrine of frozen zones of the earth's crust. Is. VIII). Moscow: Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1962: 3–35. [In Russian].
10. Dyunin A.K. *Mekhanika metelei*. Mechanics of snowstorms. Novosibirsk: Publishing house of the Siberian branch of the USSR Academy of Sciences, 1963: 378 p. [In Russian].
11. Kuz'min P.P. Melting of snow cover. Jerusalem: Israel Program for scientific Translation, 1972: iv+290 p.
12. Sosnovsky A.V., Osokin N.I., Chernyakov G.A. Dynamics of snow storages in forests and fields of Russian plains under climate changes. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018, 58 (2): 183–190. doi: 10.15356/2076-6734-2018-2-183-190. [In Russian].
13. Osokin N.I., Sosnovsky A.V. Spatial and temporal variability of depth and density of the snow cover in Russia. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 4 (128): 72–80. doi: 10.15356/2076-6734-2014-4-72-80. [In Russian].
14. Golubev V.N., Petrushina M.N., Frolov D.M. Interannual variations of the snow cover structure within the territory of Russia. *Vestnik MGU. Ser. 5. Geografia*. Moscow State University Bulletin. Ser. 5. Geography. 2009, 3: 16–25. [In Russian].
15. <http://meteo.ru/> last access 02.03.21
16. <https://rp5.ru/> last access 02.03.21
17. Akitaya E. Studies on depth hoar. *Contributions from the Institute of Low Temperature Science*. 1974, 26: 1–67.
18. Chernov R.A. Experimental determination of efficient thermal conductivity of depth hoar. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2013, 3 (123): 71–77. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-3-71-77>. [In Russian].
19. Komarov A.Y., Seliverstov Y.G., Grebennikov P.B., Sokratov S.A. Spatio-temporal heterogeneity of the snow cover from data of the penetrometer SnowMicroPen. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018, 58 (4): 473–485. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-473-485. [In Russian].
20. 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. *Journ. of Hydrology and Hydromechanics*. 2019, 67 (1): 110–112. doi: 10.2478/johh-2018-0016.