

ВЛИЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И МИКРОРЕЛЬЕФА НА СТРАТИГРАФИЮ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ПОДМОСКОВЬЕ

А.Ю. Комаров

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ снежных лавин и селей, мл. науч. с.; e-mail: ankom9@gmail.com

Измерения параметров снежной толщи и отдельных ее слоев были выполнены на северо-востоке Московской области зимой 2015–2016 гг. Целью исследования было изучение влияния локальных условий на особенности пространственного залегания и развития снежной толщи. Измерения выполнялись на трех участках со значительно различающимися растительностью и микрорельефом поверхности: в поле, на поляне и в смешанном лесу.

В период максимума снегонакопления под пологом смешанного леса наблюдалась наименьшая по сравнению с двумя другими участками высота снежного покрова. Запасы воды в лесу оказались более чем на 50% меньше, чем на поляне, и на 40% меньше, чем на поле. Снег, перехваченный кронами деревьев, осыпался при ветре, оттепелях и дополнительной аккумуляции в виде комьев и капель воды, нарушая строение снежной толщи под кронами и в радиусе одного-двух метров вокруг них. Отдельные слои снега были насыщены органикой, что привело к уменьшению альбедо поверхности и увеличению интенсивности снеготаяния. На защищенной от ветра поляне снежный покров был более глубокий и однородный, с четко выраженной стратиграфией. На поле происходило формирование неоднородных слоев метелевого уплотнения. Луговая растительность и микрорельеф оказывали влияние на пространственное распределение снега и особенности его метаморфизма, заметное в масштабе первых метров. Толщина и плотность слоев снега между кочками была больше, чем над ними. Между снежным покровом и поверхностью грунта наблюдался прослой травы, по которому формировались системы полостей высотой до десятков сантиметров и протяженностью до первых метров.

Таким образом, было установлено, что локальные факторы растительности и микрорельефа поверхности способны заметно влиять на строение снежной толщи в масштабах первых метров, а значит, на теплофизические и механические свойства снежного покрова.

Ключевые слова: снежный покров, стратиграфия снежной толщи, растительный покров, микрорельеф, плотность снега, водный эквивалент снежного покрова, Подмосковье

ВВЕДЕНИЕ

Пространственная и временная изменчивость снежного покрова обуславливается географическим положением, климатическими и погодными условиями, а также особенностями растительного покрова и рельефа поверхности. Неоднородности стратиграфии снежного покрова оказывают влияние на его теплоизоляционные свойства [Павлов, 1979; Осокин и др., 2013], глубину промерзания грунта [Котляков и др., 2019] и интенсивность метаморфизма снежной толщи [Голубев и др., 2010; Чернов, 2016]. Они же определяют пространственную и временную изменчивость запасов воды [Комаров и др., 2018; Komarov et al., 2019] и устойчивость снега на склонах [Черноус и др., 2015].

В значительно отличающихся условиях строение, свойства, особенности залегания и развития снежного покрова отличаются. В арктическом и субарктическом климатических поясах низкие температуры, сильные ветры и отсутствие древесной растительности приводит к формированию плотных и неоднородных слоев метелевого уплотнения, а на участках с густой кустарничковой растительностью происходит повышенная аккумуляция

снега по сравнению с участками, лишенными растительности [Sturm, Holmgren, 1994]. В тайге, где в течение зимнего сезона преобладает холодная и безветренная погода, пространственная изменчивость снежного покрова обусловлена в первую очередь влиянием растительного покрова, в то время как влияние ветрового переноса оказывается незначительным [Sturm, 1992; Faria et al., 2000]. В более теплых районах, к которым относится и район исследования, часты зимние оттепели и метели [Кузьмин, 1961; Дюнин, 1963]. Большое разнообразие зимних погодных условий, растительного покрова и рельефа поверхности приводят к формированию сложной стратиграфии снежной толщи, неоднородному залеганию и высокой пространственно-временной изменчивости снежного покрова [Gelfan et al., 2004; Komarov et al., 2019].

В условиях умеренного климата важную роль в распределении снежного покрова играет древесная растительность [Pomeroy, Brun, 2001; Rasmus et al., 2011]. Методика расчета значений водного эквивалента (ВЭС) на лесных участках путем умножения значений ВЭС, измеренных на поле, на «коэффициент снегонакопления», который являет-

ся постоянным для участков с аналогичными физико-географическими условиями и растительным покровом, была разработаны в 1960-х гг. [Кузьмин, 1961]. Было установлено, что для лесной зоны Европейской России коэффициент снегонакопления меняется в очень широких пределах (от 0,60 до 1,40 в хвойных лесах и от 1,04 до 1,23 – в лиственных) и зависит от ряда факторов, в том числе от характеристик растительного покрова и размера исследуемого участка [Кузьмин, 1961; Gelfan et al., 2004]. По данным этих исследований средний максимальный ВЭС на небольших лесных полянах близок к таковому в лиственных лесах, но на 5–35% больше, чем в сосновых, и на 10–60% больше, чем в еловых. В то же время средний максимальный ВЭС на больших полях и в открытых водосборах, подверженных ветровому воздействию, как правило, на 15–20% меньше, чем в соседних лесных водосборах. По данным исследований снежного покрова в районе Валдая, средние за 17 лет наблюдений (с 1967 по 1983 г.) максимальные зимние значения ВЭС на открытых участках были на 15% больше, чем на участках хвойного леса, что было связано преимущественно с повышенной сублимацией снега с крон деревьев [Gelfan et al., 2004]. За счет повышенной инсоляции интенсивность весеннего снеготаяния на полях оказалась на 23% больше, чем в лесу. При этом было установлено, что процессы, связанные с формированием и развитием снежной толщи, в большей степени определяются атмосферными процессами, их внутригодовой и межгодовой изменчивостью, нежели характеристиками растительности, и варьируют в очень широких пределах. Таким образом, закономерности, наблюдаемые на любом исследуемом участке в течение одной зимы, могут считаться характерными лишь для зим со схожими погодными условиями и для участков с аналогичными характеристиками растительности и рельефа.

Сочетание погодных условий, растительности и рельефа приводит к большому разнообразию строения и свойств снежной толщи. При этом каждый из факторов вносит свой вклад в неоднородность снежной толщи и наиболее отчетливо проявляется в соответствующем ему пространственном и временном масштабе [Sturm, Benson, 2004]. В условиях однородного равнинного ландшафта изменение стратиграфии снежного покрова, обусловленное широтной зональностью, проявляется лишь в масштабе сотен и тысяч километров. Влияние макро- (1–100 км) и мезоформ (0,01–1 км) рельефа наиболее отчетливо прослеживается в масштабах первых километров и сотен метров. В то же время изменчивость растительности и микрорельефа поверхности в масштабах первых метров и десятков

метров может играть ключевую роль в распределении снежного покрова и функционировании экосистемы [Sturm, 1992; Pomeroy, Brun, 2001; Формозов, 1990]. Следовательно, для оценки взаимного влияния снежного покрова, почвы и растительности в течение зимы необходимы систематические измерения, причем их периодичность должна быть достаточно большой ввиду высокой скорости протекания процессов метелевого переноса, просачивания жидкой воды, обрушения снега с крон деревьев и т. п.

Помимо оценки влияния снежного покрова на другие компоненты природной среды результаты полевых исследований снежного покрова необходимы для верификации климатических моделей и данных дистанционного зондирования, разрешение которых в отношении снежного покрова соответствует, в лучшем случае, масштабам сотен метров. Понимание возможного диапазона тех или иных характеристик снежного покрова внутри таких «пикселей» требует информации о закономерностях пространственно-временной изменчивости, определяемой ландшафтными условиями, микрорельефом поверхности и растительностью. Это понимание необходимо, поскольку различия в строении и свойствах снежной толщи оказывают существенное воздействие на массоэнергообмен между подстилающей поверхностью, атмосферой, гидросферой и биосферой. Современные технологии, такие как LIDAR, радар FMCW и фотограмметрия с БПЛА, позволяют получать подробные цифровые модели поверхности земли и снега с вертикальным разрешением 5–10 см. Однако измерение высоты и свойств снежного покрова под растительным покровом все еще остается проблемой. Кроме того, возможности изучения строения снежной толщи дистанционными методами по-прежнему ограничены ввиду специфических свойств снега и периодического присутствия в нем жидкой воды [Marshall, Koh, 2008; Webb et al., 2018].

В работе представлены результаты анализа и сравнения значений высоты, плотности и водозапаса снежного покрова на трех различных по своим локальным условиям участках в январе, феврале и марте 2016 г. в Подмосковье. Оценено влияние локальных факторов на особенности аккумуляции, метаморфизма и таяния снежного покрова.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования. В условиях умеренно континентального климата центральных областей европейской территории России в силу особенностей атмосферной циркуляции зимние погодные условия характеризуются значительным разнообразием: изменчивостью зимних температур, ко-

личеством, интенсивностью и формой выпадения осадков. Снегопады часто сопровождаются ветром и повышением температуры воздуха до положительных значений. Во время метелей на открытых пространствах формируются слои ветрового уплотнения [Дюнин, 1963]. По мере развития снежной толщи после зимних оттепелей формируются слои смерзшихся поликристаллов и льдистых корок [Кузьмин, 1961]. Во время глубоких морозов интенсифицируется процесс температурно-градиентного метаморфизма. В результате формируется сложная стратиграфия, отражающая погодные условия снегонакопления и процессы, происходящие в снежной толще в течение зимы. Изменчивость погодных условий и обусловливаемые ими изменения свойств снега во времени увеличивают пространственную неоднородность снежной толщи, определяемую уже и локальными факторами, такими как растительность, микрорельеф поверхности и взаимное положение различных элементов ландшафта [Gelfan, 2004; Сосновский и др., 2018; Komarov et al., 2018, 2019].

В рамках настоящего исследования зимой 2015–2016 гг. на северо-западе Московской области (Сергиево-Посадский район) были проведены наблюдения за изменением строения и свойств снежной толщи. Исследования снежного покрова в этом районе были редки и ограничены результатами полевых измерений А.П. Павлова (1961) и А.Н. Формозова (1990).

Измерения проводились в пределах трех участков с различающимся рельефом, растительностью и микрорельефом поверхности с целью оценить влияние локальных факторов на строение и свойства снежной толщи и на их изменчивость во времени и пространстве. В течение зимнего сезона на каждом из участков (поле, поляна, смешанный лес) было выполнено по четыре серии основных и ряд дополнительных измерений. Исследование снежного покрова осуществлялось на каждом из участков в шурфах шириной около 1 м. Шурфы были расположены в точках, наиболее типичных для исследуемых участков, поэтому они должны в достаточной мере характеризовать среднюю высоту и строение снежной толщи на этих участках (рис. 1).

Характеристика участков исследования. Лесной участок ($56^{\circ}14'49''$ с. ш., $38^{\circ}00'24''$ в. д.) расположен на пологонаклонной ($2-3^{\circ}$ северной экспозиции) поверхности водораздела в глубине смешанного елово-березового леса. Поверхность грунта ровная и однородная, с редкой травянистой растительностью. Шурф расположен под перекрывающимися друг друга кронами большой сухостойной ели (без игл, радиус кроны около 4 м) (верхний ярус) и орешника (средний ярус).



Рис. 1. Схема расположения шурфов на участках исследования: 1 – поляна; 2 – поле; 3 – лес; × – точки заложения шурфов

Fig. 1. Location of pits at three model sites: 1 – forest meadow; 2 – field; 3 – forest; × – location of pits

Полевой участок ($56^{\circ}14'57''$ с. ш., $37^{\circ}59'59''$ в. д.) расположен на пологонаклонной поверхности водораздела ($2-3^{\circ}$ юго-западной экспозиции), плавно понижающегося к пойме реки, и характеризуется полным отсутствием деревьев и кустарников. Размер поля 350×200 м. Высота травы небольшая ввиду активного выпаса скота. Микрорельеф поверхности однородный и слабовыраженный, но имеются отдельные кочки и понижения до 10–15 см. Ввиду небольшой по сравнению с лесным участком шероховатости поверхности и большой площади поля на нем наблюдаются повышенные скорости ветра. Шурфы расположены в центральной части поля (см. рис. 1).

Третий участок исследований представляет собой пойменную поляну размером 35×30 м ($56^{\circ}14'55''$ с. ш., $37^{\circ}59'55''$ в. д.). Поляна окружена ивами высотой от 10 до 25 м. С северо-западной стороны поляна переходит в крутой склон надпойменной террасы высотой около 30 м и крутизной от 15 до 30%. Склон переходит в пологонаклонную поверхность водораздела (полевой участок). С юго-восточной стороны протекает река Пажа. Аккумуляция снега на данном участке происходит в спокойных условиях, однако возможен перенос снега с поля. Шурфы расположены в центральной части поляны на плоском участке. Микрорельеф поверхности неоднороден и сформирован кочками травы высотой от 5 до 15 см, находящимися на расстоянии 0,5–3 м.

Методы исследования. Зимой 2015–2016 г. на исследуемой территории проводилось изучение толщины, плотности, водозапаса снежной толщи и ее отдельных слоев. Измерения включали в себя ряд визуальных и инструментальных наблюдений,

выполняемых с интервалом в одну-две недели. Измерения толщины отдельных слоев выполнялись с точностью 1 см в шурфах шириной около 1 м. Каждый последующий шурф смещался на 0,5–1 м от предшествующего. Затем выполнялось подробное описание стратиграфии снежной толщи, включающее, в соответствии с [Фирц и др., 2012], информацию о форме и размере зерен, плотности, прочности и характере залегания слоев. Непосредственно на участке исследования инструментальных измерений метеорологических величин не проводилось. Для определения значений метеорологических величин использовались и массивы данных сайта *meteo.ru* по метеостанциям Переславль-Залесский, ВДНХ, Коломна и Можайск за период с 1970 по 2019 г.

Измерение плотности слоев выполнялось при помощи ручного плотномера с прямоугольным сечением и электронных весов (точность 0,1 г). В каждом слое толщиной более 4 см (соответствует высоте плотномера) отбиралось по три пробы. На основе этих значений рассчитывалось среднее значение. Изучение формы и размера кристаллов снега происходило с использованием снегомерной палетки с размером ячейки 1 мм. Расчет значений запасов воды (водного эквивалента снежного покрова – ВЭС) в снеге производился по формуле:

$$\text{ВЭС} = \rho h / 100,$$

где ρ – плотность снега, кг/м³; h – высота снежной толщи, см.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Произведен анализ метеорологических условий аккумуляции и метаморфизма снежного покрова. На основе измеренных значений толщины и плотности слоев в шурфах построены схемы стратиграфических разрезов снежной толщи на каждую из дат измерений. Произведен расчет средневзвешенных характеристик шурфов и их сравнение. Оценено влияние пространственного положения участков, микрорельефа поверхности и растительного покрова на характер аккумуляции, изменчивость залегания и метаморфизма снежной толщи с момента его формирования до весеннего таяния.

Зимние условия снегонакопления. Зима 2015–2016 гг. на территории центральных областей европейской части России характеризовалась повышенной температурой воздуха и повышенным количеством осадков. Анализ данных метеостанций ВДНХ, Переславль-Залесский, Коломна и Можайск показали, что зима была значительно теплее, чем в среднем за период с 1970 по 2019 г., и отличалась повышенным количеством осадков. Температура воздуха была выше нормы во все месяцы кроме января. Количество осадков соответствовало средне-

многолетним значениям в ноябре и декабре, однако в январе, феврале и марте превышало их на 40–60%. В результате снежный покров сформировался достаточно рано, еще в середине ноября, но он не был устойчивым вплоть до начала января (рис. 2). К периоду максимума снегонакопления, приходящемуся на начало марта, снежная толща характеризовалась преобладанием слоев смерзшихся поликристаллов, осевшего снега и слоев с огранкой. Слои с кристаллами глубинной изморози (ГИ) получили ограниченное распространение, поскольку зима была достаточно теплой и преобладали процессы изотермического метаморфизма. Частые зимние оттепели определили преобладание в снежной толще слоев смерзшегося крупнозернистого снега.

Чередование заморозков и сильных продолжительных оттепелей в ноябре и декабре привело к тому, что в течение этих месяцев снежный покров периодически полностью таял. Только к началу января произошло формирование устойчивого снежного покрова. Январь, в отличие от ноября и декабря, характеризовался устойчивой холодной погодой со средней температурой воздуха менее –10°C, что на 2°C ниже средних многолетних значений. Накопление снега происходило в результате серии сильных снегопадов. В этот месяц оттепели отсутствовали, поэтому к концу месяца снежная толща отличалась преобладанием слоев осевшего мелкозернистого снега, иногда со следами метелевого уплотнения. Февраль отличался повышенными температурами и частыми оттепелями. В первых числах февраля в результате слабой, но продолжительной оттепели с устойчивыми положительными среднесуточными температурами произошло таяние верхних слоев, просачивание жидкой воды вглубь толщи по каналам стока и фирнизация большей части толщи. Оттепель сопровождалась выпадением жидких осадков. В марте произошло окончательное промачивание толщи. Активная фаза снеготаяния началась 25 марта, а уже к 15 апреля произошло полное таяние снежного покрова.

Особенности эволюции снежного покрова на поляне, поле, в лесу. Сравнительный анализ распределения толщины, строения и характера залегания снежной толщи на исследуемых участках в разные периоды зимы 2015–2016 гг. показал, что существуют значительные отличия, обусловленные различиями в условиях аккумуляции и метаморфизма снежной толщи (табл. 1).

Высота снежного покрова. Высота снежного покрова в шурфах, выполненных в разные даты и характеризующие снежный покров в разные этапы его развития, различались на участках исследования (рис. 3). В конце января наибольшие значения наблюдались на поле (34 см) и поляне (30 см),

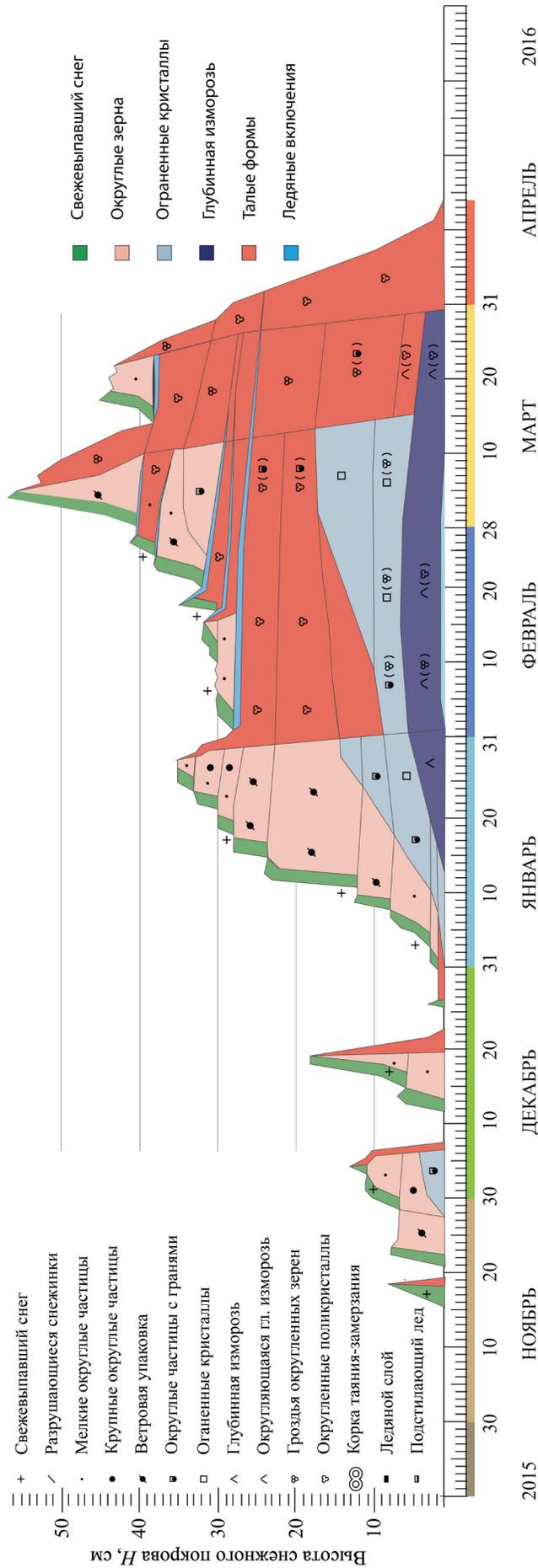


Рис. 2. Схема эволюции снежного покрова на поляне зимой 2015–2016 г. Условные обозначения соответствуют [Фирц и др., 2012]

Fig. 2. Evolution of snow cover within forest meadow in winter 2015–2016. The symbols correspond to [Fierz et al., 2012]

наименьшие — в лесу (25 см). Последующий период оттепели в начале февраля привел к уменьшению высоты снежного покрова на поле (28 см) и в лесу (18 см), в то время как на поляне наблюдался небольшой прирост (31 см). К началу марта в результате серии снегопадов толщина снега возросла на каждом из участков и составила 50, 38 и 28 см на поляне, на поле и в лесу соответственно. К середине месяца начался период снеготаяния, и толщина снега умень-

шилась до 42, 35 и 20 см соответственно. Таким образом, к периоду максимума аккумуляции высота снежного покрова на поле была на 17% меньше, чем на поляне, а в лесу — на 52% меньше, чем на поляне. Несмотря на повышенные темпы оседания снежного покрова под кронами деревьев в феврале и марте, полное таяние снежного покрова произошло несколько позже, чем на поляне, и значительно позже, чем на поле, особенно, склонах южной экспозиции.

Таблица 1

Высота, плотность и водозпасы (ВЭС) снежного покрова на поле, поляне и в смешанном лесу в конце января, начале февраля, начале и середине марта 2016 г.

Дата	Высота покрова, см			Плотность покрова, кг/м ³			ВЭС, мм		
	Поляна	Поле	Лес	Поляна	Поле	Лес	Поляна	Поле	Лес
25.01	30	34	25	169	186	162	51	63	41
07.02	31	28	18	247	241	233	77	68	42
07.03	50	38	28	239	246	205	131	94	58
17.03	42	35	20	377	390	392	158	137	78

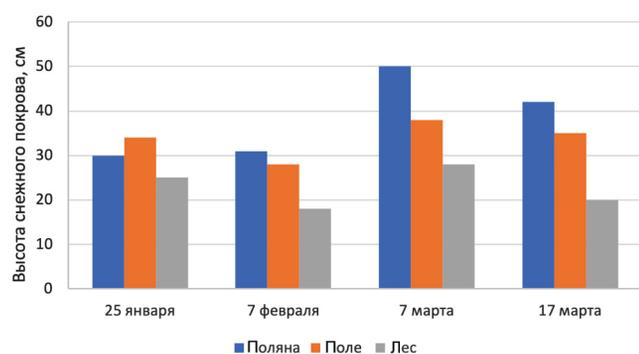


Рис. 3. Высота снежной толщи на трех участках в конце января, начале февраля, начале и середине марта 2016 г.

Fig. 3. Snow depth at three model sites in late January, early February and early and mid-March 2016

Плотность снега. Средневзвешенная плотность снега в шурфах на участках исследования увеличилась от 160–185 кг/м³ в конце января до 200–250 кг/м³ в начале марта и до 380–390 кг/м³ в середине марта (рис. 4). Резкое увеличение плотности толщи произошло в начале февраля в результате оттепели. Затем значения 230–250 кг/м³ сохранялись в течение месяца до начала активного таяния в середине марта, когда плотность отдельных слоев возросла до 450 кг/м³. Сравнение значений плотности на исследуемых участках в каждую из дат измерений свидетельствует об отсутствии значительных различий. Плотность снега на поле оказалась в среднем на 5% больше, чем на поляне, а в лесу — на 5% меньше.

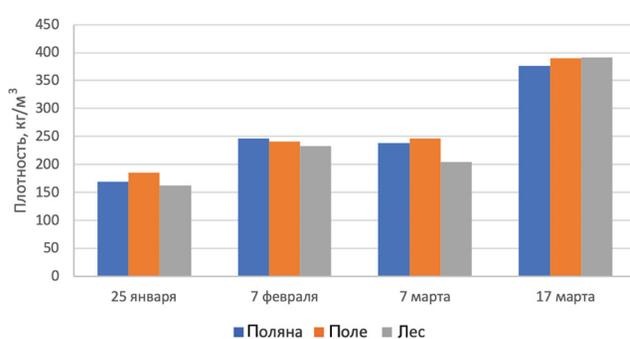


Рис. 4. Плотность снежной толщи на трех участках в конце января, начале февраля, начале и середине марта 2016 г.

Fig. 4. Snow density at three model sites in late January, early February and early and mid-March 2016

Водозапас снежного покрова. Изменчивость значений высоты и плотности привели к тому, что результирующие значения ВЭС также значительно отличались между участками (рис. 5). В конце января разница запасов воды в шурфах была невелика: наибольшие водозпасы наблюдались на поле и поляне, наименьшие — в лесу. По мере аккумуляции снежного покрова и его уплотнения значения ВЭС в толще увеличивались, причем в феврале запасы воды на поляне превысили соответствующие значения на поле и в лесу. ВЭС на поле и на лесном участке в начале марта оказались в среднем на 18% и 50% меньше, чем на поляне, соответственно. Максимальные значения водозпасов в толще повсеместно наблюдались значительно позже (на 10

и более дней), чем максимальные значения высоты снежного покрова.

Стратиграфия снежной толщи. В начале зимы на всех трех участках преобладали слои рыхлого свежего и осевшего снега (65–70%) (рис. 6). В нижней части толщи успели сформироваться слои с огранкой и ГИ (25–30%). Размер кристаллов в нижней части толщи достигал 2–3 мм, в то время как слои осевшего свежего снега были сложены мелкозернистым снегом с кристаллами менее 0,8 мм.

В результате оттепели к середине февраля большую часть толщи занимали слои осевшего влажного снега с оплавленными кристаллами. Однородность толщи была нарушена в результате неравномерного просачивания жидкой воды. Слои с огранкой деградировали, но появились корки таяния-замерзания, фирнизованные слои, линзы и пальцы просачивания. В лесу слой влажного снега у поверхности был крайне неоднороден, поскольку он подвергался воздействию опадающих комьев снега и капли с крон деревьев. Стратиграфия отличалась также отсутствием ледяного слоя на поверхности грунта, который наблюдался на полевых участках. Поверх-

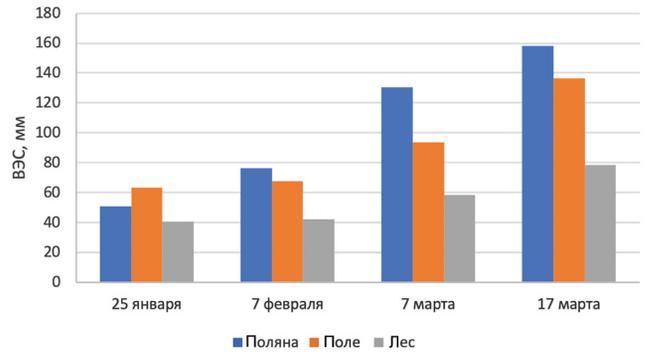


Рис. 5. Запасы воды в снежной толще на трех участках в конце января, начале февраля, начале и середине марта 2016 г.

Fig. 5. Snow water equivalent at three model sites in late January, early February and early and mid-March 2016

ность снежного покрова под кронами была покрыта органическим опадом.

В первой половине марта на поле и поляне преобладали слои смерзшихся поликристаллов и ледяных корок (30–35%). На поле эти слои оказались более льдистыми и плотными, чем на поляне, а их

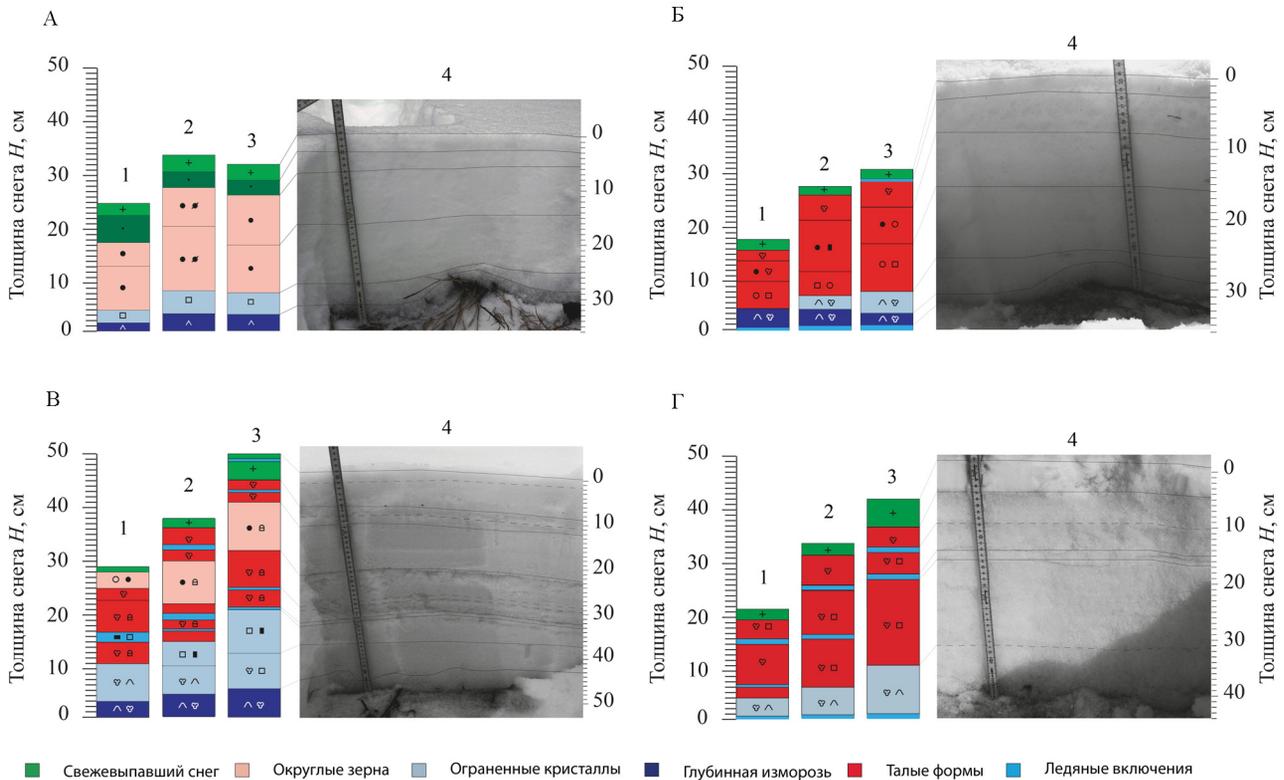


Рис. 6. Строение снежного покрова на участках исследования по состоянию на: А – 25 января 2016 г.; Б – 7 февраля 2016 г.; В – 7 марта 2016 г.; Г – 17 марта 2016 г.; 1 – лес; 2 – поле; 3, 4 – поляна. Условные обозначения см. рис. 2 [Фирц и др., 2012]

Fig. 6. Snow cover stratigraphy at the model sites on: А – January 25th, 2016; Б – February 7th, 2016; В – March 7th, 2016; Г – March 17th, 2016; 1 – forest; 2 – field; 3, 4 – forest meadow. The legend see Fig. 2 [Fierz et al., 2009]

толщина была меньше (см. рис. 6). Слои с огранкой в нижней части толщ (35–45%) оплавившись, уплотнились и смерзлись. В верхней части толщ преобладали слои свежевыпавшего и осевшего влажного снега (25–30%). В лесу около 50% толщ были сложены слоями смерзшихся поликристаллов различного возраста и плотности. Верхние 20% толщ были сложены рыхлым влажным снегом. В средней части толщ хорошо прослеживался слой, насыщенный органикой.

Таким образом, в течение зимнего сезона на каждом из трех участков исследования можно было идентифицировать аналогичные слои, однако их толщина и свойства отличались. К периоду максимума аккумуляции, наблюдавшемуся в первой половине марта, строение снежной толщ на поле отличалось повышенной плотностью льдистых корок. При этом, толщина остальных слоев была на 15–20% меньше, чем на поляне. В лесу толщина отдельных слоев была почти вдвое меньше, чем на открытых участках.

Влияние локальных факторов на строение снежной толщ. Несмотря на ограниченные возможности для исследования влияния локальных факторов на строение снежной толщ в шурфах, ширина которых не превышала 1 м, на основе измерений и визуальных наблюдений были сделаны следующие выводы (табл. 2).

Влияние микрорельефа. Микрорельеф поверхности был в той или иной степени выражен на всех трех участках и представлен кочками травы высотой от 5 до 15 см. Неоднородность поверхности

определила особенности пространственного залегания и развития снежной толщ, особенно на незалесенных участках. Наиболее крупные формы микрорельефа наблюдались на поляне. Наименее выражен он был в лесу, где травянистая растительность имела ограниченное распространение.

Аккумуляция. В безветренных условиях, характерных для поляны и лесного участка, аккумуляция снега происходила относительно равномерно, однако при высоте снега 20–30 см рельеф оказался уже значительно нивелирован. На поле, где скорость ветра была повышена, «сглаживание» рельефа происходило быстрее в силу интенсивного метелевого переноса и отложения снега в понижениях рельефа, где скорость ветра меньше. К концу зимнего сезона толщина и плотность снега в понижениях между кочками оказалась в среднем на 10–20% больше, чем над ними.

Метаморфизм. По мере аккумуляции в снежной толще произошли метаморфические процессы, интенсивность которых зависела, помимо внешних условий, и от микрорельефа поверхности [Sturm, 1992]. Над кочками и другими выпуклыми формами микрорельефа снежный покров был тоньше и сформировался позже. Сочетание неравномерного залегания снежного покрова в начале зимы и больших температурных градиентов в толще привели к значительной пространственной изменчивости слоев ГИ в нижней части толщ. Повышенная толщина слоев ГИ наблюдалась между кочками.

Таяние. Микрорельеф поверхности оказал влияние на процессы просачивания, стока и замерза-

Таблица 2

Влияние локальных факторов на особенности залегания снежного покрова и изменчивость его свойств во время аккумуляции, метаморфизма и весеннего снеготаяния

Участок исследования	Аккумуляция	Метаморфизм	Таяние
Микрорельеф	Повышенная аккумуляция снега между кочками, начиная с осеннего периода; нивелирование рельефа по мере аккумуляции	Более развитые слои ГИ в нижней части толщ и повышенная толщина корок между кочками	Более интенсивное весеннее таяние на южных участках; Концентрация воды в понижениях между кочками
Пучки травы	Задержание выпадающего снега листьями и стеблями; формирование полостей под снежным покровом	Нарушение стратиграфии снежной толщ; отсутствие четкой слоистости; повышенное развитие ГИ в полостях	Инсоляционный нагрев и повышенное таяние вокруг травинок и стеблей весной
Кроны деревьев	Перехват выпадающего снега кронами; уменьшение высоты снежного покрова в лесу; уменьшение скорости ветра	Формирование слоев пониженной толщины и плотности, особенно под кронами хвойных деревьев; нарушение однородности снежной толщ комьями снега и капелью с крон	Затенение участка кронами; уменьшение инсоляции и замедление весеннего снеготаяния; уменьшение альбедо поверхности за счет органического опада с деревьев

ния воды в толще снега и на поверхности грунта. Просочившаяся вода концентрировалась в понижениях между кочками и затем промерзала. Особенно ярко это проявлялось на участках с корками и слоями метелевого уплотнения, поскольку талая вода, достигая слабопроницаемых слоев, движется латерально в сторону понижений. В осенние и весенние месяцы микрорельеф поверхности приводил к неравномерному таянию снега вследствие неоднородного поступления солнечной энергии на его поверхность. Южные участки кочек оттаивали быстрее, чем северные. Когда отдельные участки полностью освобождались от снега, альbedo поверхности резко уменьшалось, что приводило к еще более интенсивному таянию на данном участке. Таким образом, снег над кочками таял быстрее, чем между ними.

Влияние древесной растительности. Влияние крон деревьев на снежный покров было значительным и обусловлено процессами перехвата осадков, созданием ветровой и инсоляционной тени. Поэтому строение снежной толщи в лесу значительно отличалось от ее строения в поле и на поляне.

Аккумуляция. Кроны деревьев, в особенности хвойных пород, характеризуются способностью задерживать значительную долю твердых атмосферных осадков [Sturm, 1992; Rasmus, 2011]. Под кронами сформировались «снежные колодцы» – участки пониженной высоты снежного покрова. Деревья создавали ветровую тень, поэтому на открытых участках между деревьями снежный покров отличался более равномерным строением. Ветрового уплотнения и переноса практически не наблюдалось. При ветреной погоде на поверхность снега попадали частицы органики, которые впоследствии оказали влияние на процессы метаморфизма и таяния снега в результате уменьшения альbedo поверхности.

Метаморфизм. Метаморфизм снежной толщи в лесу во многом отличался от метаморфизма на открытых участках. Помимо того что вследствие задержания снега кронами толщина и строение изначально отличались, дополнительные преобразования происходили по мере падения комьев снега, капли и органических частиц с деревьев. В результате этих процессов стратиграфия снежной толщи нарушалась, а изменчивость свойств возрастала. Наибольшие изменения наблюдались непосредственно под кронами и в радиусе нескольких метров вокруг них. Во время заморозков и активации температурно-градиентного метаморфизма в силу пониженной толщины снега и больших температурных градиентов процессы метаморфизма были интенсивны, однако теплой зимой 2015–2016 гг. слой ГИ в лесу практически отсутствовал.

Таяние. Во время весеннего снеготаяния, несмотря на значительное затенение, первыми от снега освобождались участки под кронами. Инсоляционный нагрев частиц опада, находящихся в толще и на ее поверхности, способствовал интенсификации таяния. Над иглами и листьями, лежащими на поверхности снега, формировались чаши протаивания глубиной до нескольких сантиметров. Вокруг стволов деревьев и стеблей в радиусе нескольких десятков сантиметров формировались колодцы протаивания, которые затем разрастались по мере уменьшения альbedo. Несмотря на меньшую толщину снега в лесу, чем на открытых участках, период снеготаяния в нем оказался более продолжительным, что явилось следствием пониженной инсоляции.

Влияние травянистой растительности. Несмотря на интерес исследователей к вопросу о влиянии древесной растительности на свойства снежного покрова, все-таки он изучен недостаточно, хотя ее наличие может оказывать существенное влияние на процессы метаморфизма снежной толщи и на функционирование экосистемы.

Аккумуляция. Во время аккумуляции снежного покрова наличие густой травянистой растительности приводило к увеличению шероховатости поверхности. В силу неоднородного распределения растительности интенсивность аккумуляции снега на отдельных участках различалась. Участки с густой травой отличались повышенной толщиной и изменчивостью свойств снежной толщи. Видовой состав также имел значение, поскольку морфология стеблей и листьев растений, их высота и количество влияли на снегозадерживающие свойства.

Метаморфизм. Вокруг стеблей образовывались небольшие воронкообразные полости диаметром от 1 до 3 см, достигающие поверхности грунта. Наличие этих неоднородностей оказало влияние на массо- и энергообмен системы «грунт – снег – воздух», а также между отдельными слоями. Вокруг стеблей и травинки происходил быстрый рост кристаллов ГИ, а естественное залегание снега было нарушено.

Таяние. В результате повышенного инсоляционного нагрева вокруг стеблей таяние было более интенсивным. Уже существующие неоднородности трансформировались по мере нагрева толщи вокруг стеблей: размер полостей увеличивался, у поверхности формировались воронки протаивания, которые постепенно увеличивались в ширину и глубину. Таким образом, таяние на участках с густой и неоднородной травянистой растительностью происходило быстрее, чем на более однородных участках.

ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ распределения толщины, строения и характера залегания слоев на исследуемых участках в разные периоды зимы 2015–2016 гг. показал, что существуют значительные отличия, обусловленные различиями в локальных условиях аккумуляции и метаморфизма снежной толщ. Сочетание локальных условий растительного покрова и микрорельефа поверхности определяет неоднородность строения и свойств снежной толщ в масштабах первых метров, что необходимо учитывать при моделировании и оценке изменчивости водозапаса и теплофизических свойств снежной толщ. Различия в экспозиции участков увеличивают пространственно-временную изменчивость, связанную с локальными факторами.

Пониженные по сравнению с открытыми участками водозпасы в лесу связаны с влиянием крон деревьев. Часть снега, перехваченного кронами, испаряется, а часть опадает, нарушая строение снежной толщ вокруг деревьев. Органический опад приводит к уменьшению альбедо поверхности и увеличению интенсивности снеготаяния. На по-

лянах формируется более глубокий и однородный снежный покров с отчетливой стратиграфией.

На поле происходит формирование неоднородных слоев метелевого уплотнения. Их толщина больше в понижениях рельефа и между кочками, чем на выпуклых участках. Луговая растительность и соответствующий микрорельеф также оказывают влияние на пространственно-временную изменчивость снежной толщ в масштабе первых метров. Наличие травы под снегом приводит к формированию полостей на границе грунта и снежного покрова.

Исследования снежного покрова, выполненные автором в этом же районе в другие годы в период с 2014 по 2019 г., хотя и не задокументированные, позволяют утверждать, что описанные закономерности не были специфическими для данной зимы, т. е. в целом 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, сплоченности крон, подстилающем покрове и микрорельефе могут привести к другим закономерностям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Голубев В.Н., Петрушина М.Н., Фролов Д.М. Закономерности формирования стратиграфии снежного покрова // *Лед и Снег*. 2010. № 1(109). С. 58–72.
- Дюнин А.К. Механика метелей. Новосибирск: Изд-во Сиб. отделения АН СССР, 1963. 378 с.
- Комаров А.Ю., Селиверстов Ю.Г., Гребенников П.Б., Сократов С.А. Пространственно-временная неоднородность снежной толщ по данным пенетрометра SnowMicroPen // *Лед и Снег*. 2018. Т. 58. № 4. С. 473–485. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-4-473-485.
- Котляков В.М., Сосновский А.В., Чернов Р.А. Влияние условий на контакте снег – почва на глубину ее промерзания (по наблюдениям в Курской области) // *Лед и Снег*. 2019. Т. 59. № 2. С. 182–190. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-2-40.
- Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 348 с.
- Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А. Влияние стратиграфии снежного покрова на его термическое сопротивление // *Лед и Снег*. 2013. Т. 53. № 3. С. 63–70. DOI: 10.15356/2076-6734-2013-3-63-70.
- Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 286 с.
- Сосновский А.В., Осокин Н.И., Черняков Г.А. Динамика снеготаяния на равнинной территории России в лесу и в поле при климатических изменениях // *Лед и Снег*. 2018. Т. 58. № 2. С. 183–190. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-2-183-190.
- Фицц Ш., Армстронг Р.Л., Дюран И., Этхеви П., Грин И., МакКланг Д.М., Нишимура К., Сатъявали П.К., Сократов С.А. Международная классификация для сезонно-выпадающего снега (руководство к описанию снежной толщ и снежного покрова). Русское издание // МГИ. 2012. № 2. 80 с.
- Формозов А.Н. Снежный покров как фактор среды, его значение в жизни млекопитающих и птиц СССР. М.: Изд-во МГУ, 1990. 287 с.
- Чернов Р.А. Метаморфизм и термические свойства свежевыпавшего снега (по исследованиям в Подмосковье) // *Лед и Снег*. 2016. Т. 56. № 2. С. 199–206. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-2-199-206.
- Черноус П.А., Селиверстов Ю.Г., Сучков В.Е. Влияние характеристик снега на лавинообразование // *Лед и Снег*. 2015. Т. 55. № 2. С. 53–59. DOI: 10.15356/2076-6734-2015-2-53-59.
- Gelfan A.N., Pomeroy J.W., Kuchment L.S. Modeling forest cover influences on snow accumulation, sublimation, and melt, *Journal of Hydrometeorology*, 2004, vol. 5, no. 5, p. 785–803, DOI: 10.1175/1525-7541(2004)005<0785:MF-CIOS>2.0.CO;2.
- Faria D.A., Pomeroy J.W., Essery R.L.H. Effect of covariance between ablation and snow water equivalent on depletion of snow-covered area in a forest, *Hydrological Processes*, 2000, vol. 14, no. 15, p. 2683–2695, DOI: 10.1002/1099-1085(20001030)14:15<2683::AID-HYP86>3.0.CO;2-N.
- 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, vol. 67, no. 1, p. 110–112, DOI: 10.2478/johh-2018-0016.
- Marshall H.P., Koh G. FMCW radars for snow research, *Cold Regions Science and Technology*, 2008, vol. 52, no. 2, p. 118–131, DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.04.008.

- Pomeroy J.W., Brun E. Physical properties of snow, *Snow ecology: An interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems*, 2001, p. 45–126, DOI: 10.1080/15230430.2002.12003521.
- Rasmus S., Lundell R., Saarinen T. Interactions between snow, canopy, and vegetation in a boreal coniferous forest, *Plant Ecology & Diversity*, 2011, vol. 4, no. 1, p. 55–65, DOI: 10.1080/17550874.2011.558126.
- Sturm M. Snow distribution and heat flow in the taiga, *Arctic and Alpine Research*, 1992, vol. 24, no. 2, p. 145–152, DOI: 10.2307/1551534.
- Sturm M., Holmgren J. Effects of microtopography on texture, temperature and heat flow in Arctic and Subarctic snow, *Annals of glaciology*, 1994, vol. 19, p. 63–68.
- Sturm M., Benson C. Scales of spatial heterogeneity for perennial and seasonal snow layers, *Annals of Glaciology*, 2004, vol. 38, p. 253–260, DOI: 10.3189/172756404781815112.
- Webb R.W., Jennings K.S., Fend M., Molotch N.P. Combining ground-penetrating radar with terrestrial LiDAR scanning to estimate the spatial distribution of liquid water content in seasonal snowpacks, *Water Resources Research*, 2018, vol. 54, no. 12, p. 10339–10349, DOI: 10.1029/2018WR022680.
- Электронный ресурс
Ильин Б.М., Булыгина О.Н., Богданова Э.Г., Веселов В.М., Гаверилова С.Ю. Описание массива месячных сумм осадков с устранением систематических погрешностей осадкомерных приборов. URL: <http://meteo.ru/data/506-mesyachnye-summy-osadkov-s-ustraneniem-sistematicheskikh-pogreshnostej-osadkomernykh-priborov> (дата обращения 15.03.2021).

Поступила в редакцию 15.02.2021

После доработки 25.05.2021

Принята к публикации 02.06.2021

THE INFLUENCE OF VEGETATION COVER AND MICRORELIEF ON SNOW STRATIGRAPHY IN THE MOSCOW REGION

A.Yu. Komarov

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Research Laboratory of Snow Avalanches and Debris Flows, Junior Scientific Researcher; e-mail: ankom9@gmail.com

Parameters of snow cover and its individual layers were measured through the winter of 2015–2016 in the north-east of the Moscow Oblast. The aim of the study was to reveal the influence of local conditions of the spatial pattern and evolution of snow cover. Three sites with distinctly different vegetation and microtopography (field, forest meadow and mixed forest) were selected for the study.

During the maximum accumulation of snow the depth of snow cover was the least under the mixed forest, as compared with two other sites. Water reserves in the forest were by 50% smaller than at the forest meadow and by 40% smaller than in the field. Canopy intercepted snow fall down during wind, thaw, etc., and disturbed ground snow structure under tree crowns and at 1–2 m around them. Some snow layers were full of organic matter, thus reducing the surface reflectivity and increasing the intensity of snow melting. Deeper and much more homogeneous snow cover with clear layers formed at forest meadows. At the field site stronger wind transport resulted in the formation of wind slabs. Grass vegetation and microtopography also played an important role in snow distribution and metamorphism at the first meters scale. The depth and the density of snow between tussocks were higher than on the crests. Ground vegetation produced a system of cavities up to dozens centimeters high and up to meters long at the snow-surface interface.

Thus it was found that local vegetation and microtopography have a meaningful effect of the snow structure at the scale of first meters, and could, therefore, influence the thermophysical and mechanical properties of snow cover.

Keywords: snow cover, stratigraphy of snow mass, plant cover, microrelief, snow density, water equivalent of snow cover, Moscow region

REFERENCES

- Chernous P.A., Seliverstov Y.G., Suchkov V.E. Vliyanie harakteristik snega na lavinoobrazovanie [Snow variability effect upon avalanching], *Led i Sneg*, 2015, vol. 55, no. 2, p. 53–59, DOI: 10.15356/2076-6734-2015-2-53-59. (In Russian)
- Chernov R.A. Metamorfizm i termicheskie svojstva svezhevyavshogo snega (po issledovaniyam v Podmoskov'e) [Metamorphism and thermal properties of fresh snow (study in the Moscow region)], *Led i Sneg*, 2016, vol. 56, no. 2, p. 199–206, DOI: 10.15356/2076-6734-2016-2-199-206. (In Russian)
- Dyunin A.K. *Mekhanika metelei* [Mechanics of blizzards], Novosibirsk, Sib. otdel AN SSSR Publ., 1963, p. 348. (In Russian)
- Faria D.A., Pomeroy J.W., Essery R.L.H. Effect of covariance between ablation and snow water equivalent on

- depletion of snow-covered area in a forest, *Hydrological Processes*, 2000, vol. 14, no. 15, p. 2683–2695, DOI: 10.1002/1099-1085(20001030)14:15<2683::AID-HYP86>3.0.CO;2-N.
- 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*, IACS Contribution no. 1. Paris: UNESCO–IHP. 2009, 83: 80 p.
- Formozov A.N. *Snezhnyi pokrov kak faktor sredy, ego znachenie v zhizni mlekopitayushchikh i ptits SSSR* [Snow cover as an environmental factor, its role in the life of mammals and birds of the USSR], Moscow, Moscow St. University Publ., 1990, 287 p. (In Russian)
- Gelfan A.N., Pomeroy J.W., Kuchment L.S. Modeling forest cover influences on snow accumulation, sublimation, and melt, *Journal of Hydrometeorology*, 2004, vol. 5, no. 5, p. 785–803, DOI: 10.1175/1525-7541(2004)005<0785:MF-CIOS>2.0.CO;2.
- Golubev V.N., Petrushina M.N., Frolov D.M. Zakonomernosti formirovaniya stratigrafii snezhnogo pokrova [Development Patterns of Snow Cover Stratigraphy], *Led i Sneg*, 2010, no. 1(109), p. 58–72. (In Russian)
- 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, vol. 67, no. 1, p. 110–112, DOI: 10.2478/johh-2018-0016.
- Komarov A.Y., Seliverstov Y.G., Grebennikov P.B., Sokratov S.A. Prostranstvenno-vremennaja neodnorodnost' snezhnoj tolshhi po dannym penetrometra SnowMicroPen [Spatio-temporal heterogeneity of the snow cover from data of the penetrometer SnowMicroPen], *Led i Sneg*, 2018, vol. 58, no. 4, p. 473–485, DOI: 10.15356/2076-6734-2018-4-473-485. (In Russian)
- Kotlyakov V.M., Sosnovsky A.V., Chernov R.A. Vliyanie uslovij na kontakte sneg – pochva na glubinu ejo promerzaniya (po nabljudenijam v Kurskoj oblasti) [Influence of the snow – soil contact conditions on the depth of ground freezing (based on observations in the Kursk region)], *Led i Sneg*, 2019, vol. 59, no. 2, p. 182–190, DOI: 10.15356/2076-6734-2019-2-407. (In Russian)
- Kuzmin P. *Protsess tayaniya shezhnogo pokrova* [Melting of Snow Cover], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1961, 348 p. (In Russian)
- Marshall H.P., Koh G. FMCW radars for snow research, *Cold Regions Science and Technology*, 2008, vol. 52, no. 2, p. 118–131, DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.04.008.
- Osokin N.I., Sosnovsky A.V., Chernov R.A. Vliyanie stratigrafii snezhnogo pokrova na ego termicheskoe soprotivlenie [Influence of snow cover stratigraphy on its thermal resistance], *Led i Sneg*, 2013, vol. 53, no. 3, p. 63–70, DOI: 10.15356/2076-6734-2013-3-63-70. (In Russian)
- Pavlov A.V. *Teplofizika landshaftov* [Thermophysics of landscapes], Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, 286 p. (In Russian)
- Pomeroy J.W., Brun E. Physical properties of snow, *Snow ecology: An interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems*, 2001, p. 45–126, DOI: 10.1080/15230430.2002.12003521.
- Rasmus S., Lundell R., Saarinen T. Interactions between snow, canopy, and vegetation in a boreal coniferous forest, *Plant Ecology & Diversity*, 2011, vol. 4, no. 1, p. 55–65, DOI: 10.1080/17550874.2011.558126.
- Sosnovsky A.V., Osokin N.I., Chernyakov G.A. Dinamika snegozapasov na ravninnoj territorii rossii v lesu i v pole pri klimaticeskikh izmenenijah [Dynamics of snow storages in forests and fields of Russian plains under climate changes], *Led i Sneg*, 2018, vol. 58, no. 2, p. 183–190, DOI: 10.15356/2076-6734-2018-2-183-190. (In Russian)
- Sturm M. Snow distribution and heat flow in the taiga, *Arctic and Alpine Research*, 1992, vol. 24, no. 2, p. 145–152, DOI: 10.2307/1551534.
- Sturm M., Holmgren J. Effects of microtopography on texture, temperature and heat flow in Arctic and Subarctic snow, *Annals of glaciology*, 1994, vol. 19, p. 63–68.
- Sturm M., Benson C. Scales of spatial heterogeneity for perennial and seasonal snow layers, *Annals of Glaciology*, 2004, vol. 38, p. 253–260, DOI: 10.3189/172756404781815112.
- Webb R.W., Jennings K.S., Fend M., Molotch N.P. Combining ground-penetrating radar with terrestrial LiDAR scanning to estimate the spatial distribution of liquid water content in seasonal snowpacks, *Water Resources Research*, 2018, vol. 54, no. 12, p. 10339–10349, DOI: 10.1029/2018WR022680.

Web source

- Ilyin B.M., Bulygina O.N., Bogdanova E.G., Veselov V.M., Gavrilova S.Yu. Opisanie massiva mesjachnykh summ osadkov, s ustraneniem sistematiceskikh pogreshnostej osadkomernykh priborov [Monthly precipitation totals with the elimination of systematic errors of precipitation gauges], URL: <http://meteo.ru/data/506-mesyachnye-summy-osadkov-s-ustraneniem-sistematiceskikh-pogreshnostej-osadkomernykh-priborov> (date access 15.03.2021).

Received 15.02.2021

Revised 25.05.2021

Accepted 02.06.2021