17. Изучение пространственно-временной неоднородности снежной толщи на площадке метеорологической обсерватории МГУ зимой 2016/2017 гг.

Комаров А. Ю., Селиверстов Ю.Г., Сократов С.А., Гребенников П.Б.

Исследование направлено на изучение пространственной и временной изменчивости структуры и характеристик снежного покрова, быструю идентификацию слоев на основе значений прочности и ее вариации, полученных на основе данных пенетрометра высокого разрешения SnowMicroPen (SMP). Работа выполнена на площадке метеорологической обсерватории МГУ в Москве, Воробьевы горы. Исследования включали в себя регулярные замеры автоматическим датчиком толщины снежного покрова с дискретностью 1 раз в 15 минут, периодические наблюдения за строением и развитием снежной толщи в шурфе с определением температуры, плотности, размера и типа кристаллов снега, измерения прочности снега с использованием пенетрометра высокого (4 Мкм) разрешения SMP. Измерения прочности выполнялись через каждые 50 см вдоль линии протяженностью 10 м (по 20 измерений). На основе анализа полученной информации разработана схема развития снежного покрова. Анализ данных показал высокую пространственную и временную изменчивость строения и параметров снежного покрова как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Это свидетельствует о сильном влиянии таких факторов, как воздействие ветра и жидкой воды на развитие снежной толщи. Было установлено, что пространственная и временная изменчивость характеристик снежного покрова существенна даже в пределах однородного равнинного ландшафта.

Введение

Составление прогноза лавинной опасности требует оперативного получения максимально возможного количества информации о строении и свойствах снежного покрова на склонах и быстрой ее интерпретации для прогноза лавинной опасности. Значительная пространственно-временная изменчивость строения и свойств снежного покрова во многом усложняет задачу.

Изучению пространственно-временной изменчивости строения и свойств снежного покрова посвящены работы Л.А. Канаева, А.А. Чирковой, П.А. Черноуса и других авторов (Канаев, 1969; Черноус и др., 2010; Чиркова, 1977). Как правило, рассматривается изменчивость таких показателей как толщина снежного покрова и его отдельных слоев, плотность, сопротивление на сдвиг. Но существуют определенные сложности, вызванные как объективными, так и субъективными причинами, определяющие качество выполняющихся наблюдений и измерений. Получение необходимых данных требует значительных временных и физических затрат на рытье шурфов, проведение измерений. Выделение отдельных слоев в снежной толще субъективно и качественно зависит от опыта наблюдателя. Использование весового снегомера ВС-43 и других, часто самодельных, приборов не позволяет выполнять или ограничивает по качеству измерения необходимых значений в тонких структурных неоднородностях, важных, к примеру, для исследования процесса лавинообразования, таких как ледяные корки и разрыхленные прослойки. Различия прилагаемых усилий к рамке при исследовании сопротивления снега на сдвиг практически неизбежны. Изучение прочности различных слоев снега с использованием таких приборов как зонд Хефели в Советском Союзе и позднее в России было достаточно редким. Этот прибор также имеет ограничения в интерпретации результатов - позволяет выявить только достаточно крупные по толщине слои внутри снежной толщи. Таким образом исследование строения и свойств снежного покрова и их пространственно-временной изменчивости сопряжено с трудностями, определяемыми недостатками приборной базы и «человеческим фактором», а получаемые данные имеют значительную погрешность.

Новые возможности для изучения прочности снега и его пространственно-временной изменчивости дает пенетрометр высокого разрешения SnowMicroPen (см. Литературу) разработанный в Швейцарском институте снеголавинных исследований (SLF). Пенетрометр высокого разрешения SnowMicroPen представляет собой устройство, позволяющее проводить измерения прочности связей между зернами снега в снежной толще и получать информацию о ее состоянии, стратиграфии и устойчивости (Pielmeier. 2009; Schneebeli, 1998). Отличительной чертой данного прибора является его высокая точность и скорость работы. Движимый электромотором с постоянной скоростью сквозь

снежную толщу щуп с датчиком сопротивления приложенному воздействию на конце фиксирует и записывает на флэш-карту значения через каждые 4 микрометра. Измерение прибором исключает ошибки, вызываемые "человеческим фактором", такие как применение различных усилий, неточная регистрация значений, недобор пробы и пр.

Основной целью настоящего исследования является апробация прибора SnowMicroPen в отличных от альпийских физико-географических условиях и определение лимитирующих факторов его использования. Статистический анализ полученных в ходе измерений данных позволяет определить значения ряда параметров (среднего, коэффициента вариации) для каждого слоя снега, и оценить, какие сочетания значений характеризуют тот или иной тип снега. Данный метод особенно актуален для снеголавинных исследований, поскольку позволяет реконструировать строение снежной толщи, оперативно идентифицировать слои с различными свойствами и выявлять ослабленные, лавиноопасные слои без копания шурфов.

Данные и методы

Методика использования прибора заключается в периодических линейных (через определенные интервалы) измерениях. Происходит постепенное накопление массива информации и его обработка в специальных программах методами статистического и графического анализа. В шурфах и траншеях выполняются измерения толщины снежного покрова и отдельных его слоев, их плотности, температуры, размера и формы зерен.

Исследования включали в себя регулярные замеры автоматическим датчиком толщины снежного покрова с дискретностью 1 раз в 15 минут, периодические наблюдения за строением и развитием снежной толщи в шурфе с определением описанных выше параметров. Измерения прочности выполнялись через каждые 50 см вдоль профиля протяженностью 10 м. На основе анализа полученной информации в соответствии с международной классификацией сезонно выпадающего снега (Комаров и др., 2015) составлена схема развития снежного покрова за 2016/17 зимние сезоны. Значения вариации прочности были рассчитаны для каждого слоя по продольным и поперечным

профилям и являются отражением пространственной неоднородности снежной толщи. Вариация прочности по поперечному профилю рассчитана как среднее значение вариации внутри слоя, осредненное между 20 точками. Вариация по продольному профилю рассчитана на основе средних значений прочности слоя в каждой точке (с интервалом 0,5 м).

Данные, полученные в результате исследований снежного покрова в Москве в 2016/17 году свидетельствуют о значительной пространственной-временной неоднородности и межгодовой изменчивости развития снежного покрова, включая даты установления, максимальной толщины и разрушения покрова, стратиграфии и распределения значений исследуемых параметров внутри толщи.

Результаты наблюдения

Характер формирования и залегания снежного покрова в 2016-2017 годах в Москве значительно отличался от наблюденных в 2014-2015 годах (Комаров, 2015), хотя прослеживались общие закономерности, такие как формирование мощных ледяных корок и слоев с преобладанием талых форм в результате просачивания жидкой воды во время оттепелей с последующим их промерзанием и консолидацией (рис. 17.1). Снежный покров установился 28 октября, что на 36 дней раньше, чем в первый год наблюдений. Максимум снегонакопления наблюдался 16 февраля, на 4 дня позже чем в 2014/15 годах. Снег достиг своей максимальной толщины 40 см, после чего началась его быстрая деградация, связанная с резким повышением среднесуточных значений температуры воздуха до положительных значений. Полное разрушение устойчивого снежного покрова произошло 13 марта, на 26 дней раньше чем в 2014/15 годах. Таким образом, в 2016/17 зимний сезон наблюдалась значительная сдвижка периода снегонакопления по сравнению с 2014/15 годами. При этом, максимум снегонакопления пришелся на один и тот же период. Зима характеризовалась ранним началом и завершением зимнего сезона, умеренной толщиной снежного покрова и редкими, но продолжительными оттепелями, в результате которых стратиграфия и свойства снежной толщи претерпевали значительные изменения.

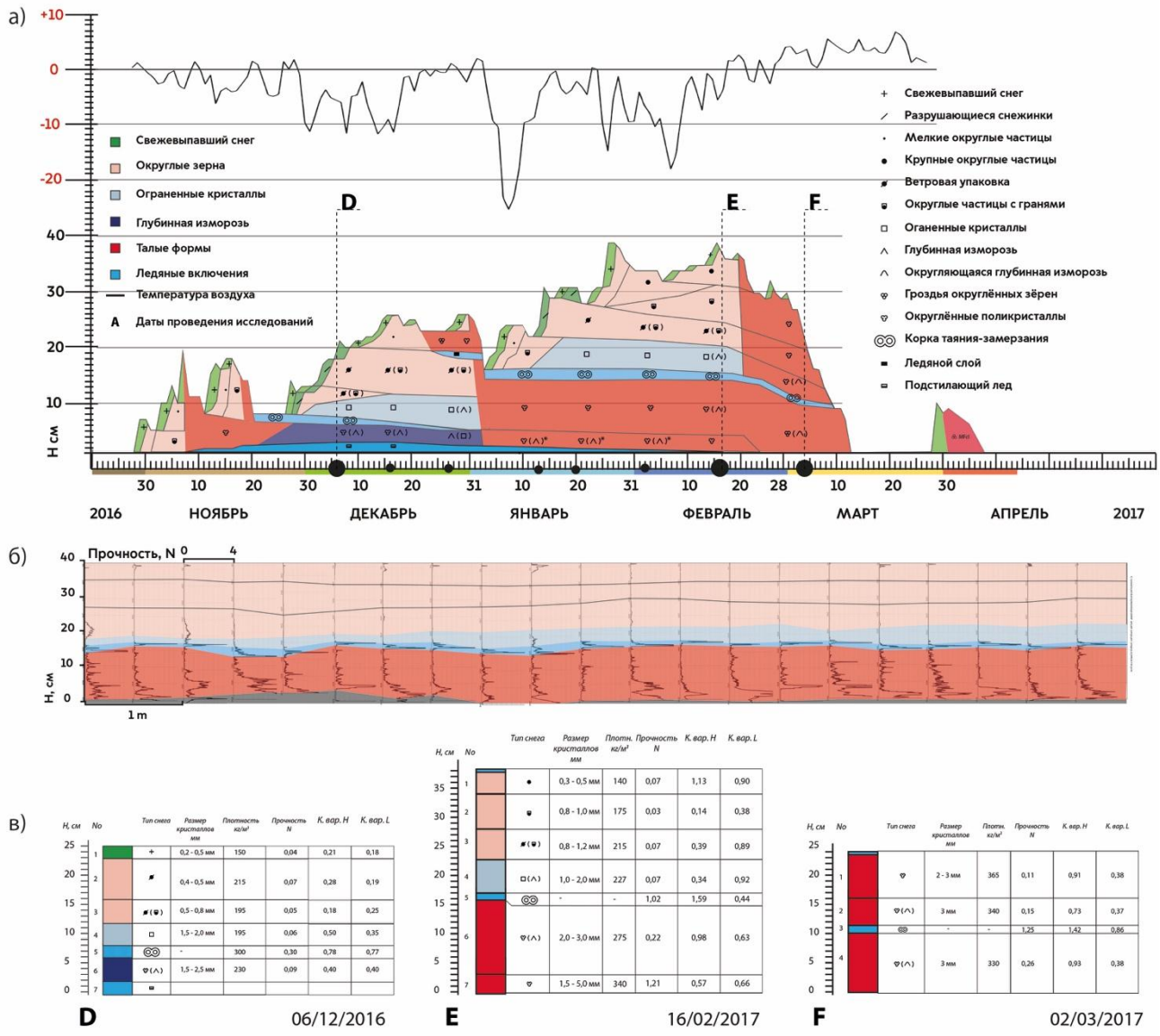

Рисунок 17.1. Схема временной неоднородности развития снежного покрова зимой 2016-2017 гг. Москва, Метеостанция МГУ (а); схема пространственной неоднородности стратиграфии и значений прочности по данным SMP (черные линии) вдоль 10 метрового профиля в период максимума снегонакопления 16/02/2017 (б); значения исследуемых параметров снежной толщи в периоды начала аккумуляции, максимума снегонакопления, и активной фазы таяния снега (в).

Плотность и стратиграфия

Измерения плотности и стратиграфии снежной толщи были выполнены 8 раз в период с 06.12.16 по 02.03.17 (рис. 17.1 в) На основе полученных данных была построена схема эволюции снежного покрова в 2016/17 годах, на которой прослеживается 3 основных цикла (периода) (28.10.16 – 25.11.16, 25.11.16 – 04.01.17 и 04.01.17 – 13.03.17). В октябре-ноябре аккумуляция снежного покрова происходила в условиях умеренных

температур (Тср=-1,8°С), при небольших скоростях ветра, в результате чего сформировалась толща 18-20 см рыхлого мелкозернистого (менее 0,5 мм) однородного снега. В периоды похолоданий начинали формироваться кристаллы с огранкой. Затем, в результате серии оттепелей и миграции жидкой воды сквозь толщу, произошло оседание снежной толщи до 8 см и ее уплотнение. К 20.11.16 основная часть снежной толщи оказалась значительно фирнизована и сложена талыми формами, преимущественно смерзшимися округленными поликристаллами и гроздьями округлых зерен, следы огранки полностью исчезли. На поверхности промерзшей почвы сформировался слой подстилающего льда толщиной до 2-3 см, который прослеживался до конца зимнего сезона. Второй мощный слой льда толщиной до 2 см образовался на поверхности. Наличие ледяных слоев оказало в дальнейшем значительное влияние на развитие процессов рекристаллизации снега внутри толщи.

Период с конца ноября по начало января (25.11.16 - 04.01.17) характеризовался морозной погодой (до -12°С, при средней температуре -4,1°С) и аккумуляцией снега при значительных скоростях ветра. В результате серии метелей в декабре поверх фирнового слоя была накоплена толща мощностью около 20 см уплотненного (150 - 215 кг/м^3) сухого мелкозернистого снега (менее 0,5 мм) типа мягкой метелевой доски. Суммарная максимальная толщина снежного покрова на данный период составила 26 см. По мере аккумуляции, в условиях преобладания низких температур и высокого температурного градиента, происходила активная перекристаллизация снега, наблюдался рост размера кристаллов (до 0,8-3 мм) и формирование неустойчивых, потенциально лавиноопасных слоев пониженной прочности и плотности (215-235 кг/м^3). Процесс затронул даже нижний, сильно фирнизованный, смерзшийся слой, сформировавшийся в ноябре, в результате чего его микроструктура еще более усложнилась, появились ниши глубинной изморози с кристаллами до 2 и более мм. К концу декабря снежная толща характеризовалась преобладанием ограненных форм кристаллов среднезернистого (СЗ) и крупнозернистого (КЗ) снега и довольно четко выраженной слоистостью. Корка оттепели конца ноября почти полностью разрушилась, в результате чего сформировался мощный, до 10 см, слой разрыхления с кристаллами глубинной изморози (ГИ) до 3 мм и средней плотностью 220 кг/м^3. В целом, в течение декабря наряду с процессами перекристаллизации происходило гравитационное уплотнение снежной толщи. Так, по данным измерений 06.12.16, плотность верхних 18 см снежной толщи варьировала от 150 до 215 кг/м^3, нижних 7 см –

от 230 до 400 кг/м^3. Средняя плотность снежной толщи составила 215 кг/м^3. По данным наблюдений 15.12.16, значения плотности варьировали от 100 до 400 кг/м^3 при среднем показателе 225 кг/м^3. 27.12.16 были зафиксированы значения плотности в интервале от 115 до 400 кг/м^3 при среднем значении около 250 кг/м3.

В первых числах января в результате оттепели с повышением температуры до +4 °С и обильными жидкими осадками произошло резкое изменение свойств и стратиграфии снежного покрова. В течение 2-х дней суммарная толщина снежного покрова сократилась с 26 до 16 см и полностью пропиталась жидкой водой, кристаллы приобрели округлые формы, огранка сохранилась лишь локально (в нишах слоя фирна начала осени), образовались многочисленные льдистые неоднородности, такие как линзы, прослои и корки льда. В результате прихода мощных арктических масс произошло быстрое промерзание (03.01.17) и консолидация снежной толщи, сформировался очень твердый и плотный слой сильно льдистого фирна со средней плотностью около 310 кг/м^3, состоящий из смерзшихся оплавленных кристаллов и поликристаллов округлых форм до 2-3 мм и конгломератов до 1-2 см. На поверхности образовалась серия из 2-х корок льда суммарной толщиной около 2 см и плотностью более 500 кг/м^3.

Период с 03.01.17 по 20.02.17 отличался морозной погодой (Т ср = - 7,7 °С, Т мин = - 25,3°С), отсутствием значительных оттепелей и активной аккумуляцией снега в результате метелевой деятельности. Особенности аккумуляции и процессов, происходивших в снежной толще в этот период, во многом повторяли картину, наблюдавшуюся в декабре. Аккумуляция снежного покрова происходила преимущественно во время метелей, формируя довольно мощные, по 5-10 см, слои уплотненного мелкозернистого (МЗ) снега, менее 0,5 мм, снега типа мягкой метелевой доски плотностью 160-200 кг/м^3. К середине февраля плотность слоев с ветровой упаковкой варьировала от 175 до 230 кг/м^3. Как и в декабре, в результате сильных температурных градиентов, происходила активная перекристаллизация снежной толщи, особенно верхней, не фирнизованной ее части, сопровождающаяся образованием слоев с огранкой и глубинной изморози, ростом размера кристаллов (до 0,8 - 2 мм) и уменьшением прочностных характеристик. Более рыхлые слои, отложенные при низких скоростях ветра, отличались повышенными темпами развития огранки, более плотные – пониженными. Так или иначе, к середине февраля снежная толща характеризовалась преобладанием СЗ-КЗ кристаллов ограненных форм.

Наименее устойчивый, сыпучий слой сформировался над ледяной коркой начала января, здесь наблюдались КЗ кристаллы до 2 мм и кристаллы ГИ до 3 мм. Слой фирна 0-15 см сохранил свои свойства, но претерпел некоторые изменения. Его плотность, по данным наблюдений, практически не менялась с момента образования и варьировала в пределах от 290 до 315 кг/м^3. Слой фирна характеризовался преобладанием талых оплавленных форм смерзшихся поликристаллов 2-3 мм, с весьма неоднородным строением, наличием многочисленных льдистых неоднородностей, корок в разной стадии разрушения, смерзшихся зернистых конгломератов и зон разрыхления с отдельными кристаллами ГИ до 3-4 мм. Особенно сложная микроструктура наблюдалась в слое 0-5 см, сформировавшемся осенью, в начале сезона снегонакопления. Размер отдельных поликристаллов достигал 4-5 мм. Слой отличался чередованием участков очень твердого и плотного сильно льдистого фирна, конгломератов и линз льда до 2-3 см хаотичного простирания, а также локальных участков разрыхления с кристаллами ГИ размером до 3-4 мм. Его средняя плотность к началу периода снеготаяния составила 340 кг/м^3.

Период с 20.02.17 по 13.03.17 характеризовался активным таянием снега, уплотнением снежной толщи и ее фирнизацией в результате многочисленных циклов таяния-замерзания. В этот период, по данным замера 02.03.17, в шурфе преобладали сильно льдистые слои талых форм - оплавленного крупнозернистого снега и смерзшихся поликристаллов с зернами до 2-3 мм, многочисленными конгломератами до 1-2 см и льдистыми включениями различного генезиса. Днем в результате воздействия положительных температур и жидких осадков происходило оседание толщи, сопровождающееся просачиванием и замерзанием жидкой воды внутри толщи. Ночью - ее промерзание и консолидация. Значения плотности возросли и по данным замера 02.03.17 варьировали от 330 до 400 кг/м^3, при среднем значении около 350 кг/м^3. Полное разрушение устойчивого снежного покрова произошло 13.03.17, что почти на месяц раньше, чем в 2014/15 годах.

Прочность

Описание изменения значений сопротивления зерен снега приложенному воздействию датчика (прочности) зимой 2016/17 гг. представляется для периода начала формирования снежной толщи (06.12.16), периода максимума снегонакопления (16.02.17),

и периода наиболее активной фазы весеннего снеготаяния (02.03.17). Результаты исследования прочности снежного покрова представлены в таблицах (рис. 17.1 б).

Было определено, что зимой 2016/17 гг. значения прочности, осреднённые по слоям, варьировали от 0,03 N до 1,25 N при значениях коэффициента вариации от 0,14 до 1,59 по поперечному и от 0,18 до 0,92 по продольному профилям, что соответствует значениям, полученным в 2014/15 гг.

В начале зимы строение снежной толщи было достаточно однородным. По данным 06.12.17 значения прочности по слоям варьировали от 0,04 до 0,30 N, значения коэффициента вариации составили 0,18 - 0,78 по поперечному и 0,18 - 0,77 по продольному профилям. Среднее значение прочности для всей толщи составило 0,08 N. При этом, в верхней рыхлой части толщи значения прочности (0,04-0,07 N) и ее вариации (0,18-0,50; 0,18-0,35 для поперечного и продольного профилей соответственно) оказались меньше, чем в нижней, фирнизованной, льдистой части, подвергшейся процессам таяния-промерзания в начале периода аккумуляции (0,09-0,30 N), (0,40-0,78; 0,40-0,77).

В период максимума снегонакопления, по данным 16.02.17, были зафиксированы значения прочности в интервале от 0,03 до 1,21 N, при значениях коэффициента вариации 0,14-1,59 по поперечному и 0,38-0,92 по продольному профилям. Среднее значение прочности для всей толщи составило 0,27 N. В верхней, рыхлой части толщи значения прочности варьировали в пределах 0,03-0,07 N, коэффициента вариации – 0,14-1,13; 0,38-0,92 для поперечного и продольного профилей соответственно. В нижней, фирнизованной части толщи они составили 0,22-1,21 N; 0,57-1,59 и 0,44-0,66 соответственно.

В период весеннего снеготаяния происходило просачивание жидкой воды, разрушение связей между кристаллами, слияние и фирнизация слоев, вследствие чего наблюдалось уменьшение среднего по толще значения прочности до 0,12 N. По данным 02.03.17, осредненные по слоям значения прочности варьировали от 0,11 до 1,25 N, коэффициента вариации – от 0,73 до 1,42 и от 0,38 до 0,76 для поперечного и продольного профиля соответственно. При этом, постепенное разрушение ледяных корок в сочетании с увеличением размера кристаллов и частой повторяемостью циклов таяния-замерзания привело к формированию сильно льдистых слоев и появлению многочисленных микронеоднородностей, о чем свидетельствует увеличение значений коэффициента

вариации. В слое ледяных корок наблюдались максимальные значения коэффициента вариации – 1,42 по поперечному и 0,86 по продольному профилям. Показатель пространственной неоднородности по продольному профилю показал значительное увеличение по сравнению с предшествующим периодом в этом слое.

Исследование подтвердило выводы, полученные зимой 2014/15 гг., и показало, что наименьшие значения прочности соответствуют однородным слоям рыхлого свежевыпавшего и мелкозернистого снега (0,03-0,07 N), а также типичны для слоев с огранкой и глубинной изморози (0,06-0,15 N). Наибольшие средние по слоям значения прочности характеризуют сильно льдистые слои и ледяные корки (0,22 - 1,25 N). В этих же слоях наблюдаются наибольшие значения вариации по поперечному и продольному профилям. При этом, в конце зимнего сезона коэффициент вариации по продольному профилю сильно уменьшается, а по поперечному - возрастает. Это может быть связано с характером инфильтрации жидкой воды сквозь толщу. В случае быстрой равномерной инфильтрации талой воды сквозь толщу происходит слияние слоев и коэффициент вариации по продольному профилю уменьшается. Если инфильтрация происходит постепенно, по локальным зонам просачивания-промерзания, коэффициент вариации по продольному профилю возрастает.

В целом, значение прочности увеличивается в соответствии с увеличением льдистости и размера кристаллов слоя (в частности, с увеличением циклов таяния-замерзания и степени фирнизации толщи). Наибольшие значения прочности наблюдаются при промерзания толщи после оттепелей. В период снеготаяния значения прочности уменьшаются вследствие разрушения связей между зернами. Аналогичным образом выглядит распределение значений коэффициента вариации — разброс значений максимален для слоев крупнозернистого снега и смерзшихся поликристаллов с многочисленными ледяными включениями и конгломератами зерен и минимальны для однородных рыхлых слоев свежевыпавшего снега и глубинной изморози.

Таким образом, даже в пределах однородного, равнинного, с травянистой растительностью, ландшафта площадки метеорологической обсерватории МГУ наблюдается значительная вариация толщины и значений прочности слоев. Характер залегания слоев и распределения исследуемых параметров во многом зависит от микрорельефа поверхности и характера инфильтрации воды. Это особенно четко

проявляется для нижних слоев снежной толщи. Рельеф подстилающей поверхности нивелируется во время метелей, поэтому стратиграфия верхней части снежной толщи более равномерна. Мы также предполагаем, что рельеф поверхности влияет на характер расположения зон просачивания и замерзания жидкой воды, что значительно усложняет структуру снежной толщи, но подобные вопросы требуют дополнительных специальных изысканий.

Обсуждение

Лимитирующие факторы

В ходе выполнения работ были отмечены факторы, лимитирующие возможности использования прибора SMP в подобных климатических условиях.

В Москве основные сложности были связаны с фиксацией верхней и нижней границы снежной толщи. Несмотря на высокую чувствительность прибора, плотность и прочность верхнего слоя свежевыпавшего снега, сложенного частично фрагментированными снежинками, оказывается крайне низкой и не позволяет четко определить верхнюю границу снежного покрова, что ведет к погрешности определения значений. Аналогичная проблема имеется с фиксацией нижней границы подстилающего слоя в том случае, если снежный покров лежит на талой почве. В этом случае прибор, пробивая плотные твердые слои нижнего слоя снега, характерные для подобной ситуации, входит непосредственно в грунт до тех пор, пока не достигнет критических значений сопротивления датчику. Таким образом, он не только вносит значительную погрешность в полученные данные, но и забивается грунтом, осложняя дальнейшее использование.

Перспективы использования прибора

Методические сложности интерпретации полученных данных связаны с отсутствием четкого алгоритма автоматического выделения слоев в снежной толще. На данном этапе выделение слоев происходит на основе экспертной оценки в процессе изучения шурфа, а затем границы уточняются по «перегибам» на графике. Таким образом, наиболее актуальной задачей, связанной с использованием прибора, является поиск решения, позволяющего производить автоматическую идентификацию слоев при помощи математического аппарата, а также определение сочетаний параметров, характеризующих

тот или иной тип снега в конкретных климатических условиях и быструю идентификацию потенциально лавиноопасных слоев.

Выводы

Хотя измерения твердомера дискретны, они охватывают всю снежную толщу независимо от толщины отдельных субъективно выделенных слоев, что дает возможности для автоматизированного выявления слоев по значениям прочности и ее дисперсии и обнаружения потенциально лавиноопасных слоев с установлением их параметров. Частота измерений прочности (4 мкм), осуществляемых твердомером, позволяет установить более детальные по сравнению с другими характеристиками изменения их по профилю, выделить гораздо большее число слоев, нежели традиционными методами, а так же уточнить границы визуально выделенных слоев.

Анализ полученных данных показал высокую пространственную и временную изменчивость строения и параметров снежного покрова как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Это свидетельствует о сильном влиянии таких факторов, как воздействие ветра и жидкой воды на временную и пространственную эволюцию снежной толщи. Было установлено, что изменчивость стратиграфии и свойств снежного покрова существенна даже в пределах однородного равнинного ландшафта. Распределение значений исследуемых параметров в толще подтверждает наличие в ней неоднородностей, связанных с микрорельефом подстилающей поверхности и ее растительностью.

Наибольшие значения прочности и ее вариации характерны для неоднородных, сильно льдистых, смерзшихся крупнозернистых слоев, в то время как минимальные их значения типичны для однородных слоев мелкозернистого и свежевыпавшего слабо метаморфизованного снега, а так же для слоев разрыхления и глубинной изморози. Также установлено, что изменчивость значений прочности по поперечному профилю выше, чем по продольному.

Прибор SnowMicroPen может использоваться в различных климатических условиях, но требует доработки, поскольку его использование в условиях метелей и низких температур затруднено, а зачастую и вовсе невозможно в связи с техническими трудностями. В Москве имеются сложности с идентификацией верхней и нижней границ снежной толщи.

Литература

Канаев Л.А. Об изменчивости свойств снега // Тр. САРНИГМИ. 1969. Вып. 44 (59). С. 25–42.

Комаров А.Ю., Селиверстов Ю.Г., Сократов С.А., Гребенников П.Б. Изучение пространственно-временной неоднородности снежной толщи с использованием пенетрометра высокого разрешения SnowMicroPen на территории метеорологической обсерватории МГУ // Эколого-климатические характеристики атмосферы в 2015 г. по данным метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова / Чубарова Н. Е. (ред.), место издания МАКС Пресс Москва, с. 201-210

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.: Институт географии РАН, Гляциологическая ассоциация .

Черноус П.А., Барашев Н.В., Федоренко Ю.В. Изменчивость характеристик снега и образование лавин // Лёд и Снег. 2010. No 3 (111). С. 27–36.

Чиркова А.А. Статистический анализ распределения глубины снежного покрова на малых площадях в горах // Тр. САРНИГМИ. 1977. Вып. 37 (118). С. 43–50.

Pielmeier, C., and H.-P. Marshall (2009), Rutschblock-scale snowpack stability derived from multiple quality-controlled SnowMicroPen measurements, Cold Regions Science and Technology, 59(2-3), 178– 184

Schneebeli, M., and J. B. Johnson (1998), A constant-speed penetrometer for high-resolution snow stratigraphy, Annals of Glaciology, 26, 107–111.

Schneebeli, M., C. Pielmeier, and J. B. Johnson (1999), Measuring snow microstructure and hardness using a high resolution penetrometer, Cold Regions Science and Technology, 30(1-3), 101–114

The SnowMicroPen as a tool to integrate multiple scales in quantitative snow measurements http://www.wsl.ch/fe/schnee/projekte/SnowMicroPen/index_EN last access 10.10.16.

SnowMicroPen a high resolution snow micro penetrometer User Manual. http://www.wsl.ch/fe/schnee/Schneephysik/SnowMicroPen/User_Manual_SMP2_v30_r3.pdf retrieved 10.10.16