

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И СНЕЖНЫЕ ЛАВИНЫ

УДК 551.321.7

doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-473-485

Пространственно-временная неоднородность снежной толщи по данным пенетromетра SnowMicroPen

© 2018 г. А.Ю. Комаров*, Ю.Г. Селиверстов, П.Б. Гребенников, С.А. Сократов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*ankom9@gmail.com

Spatio-temporal heterogeneity of the snow cover from data of the penetrometer SnowMicroPen

A.Y. Komarov*, Y.G. Seliverstov, P.B. Grebennikov, S.A. Sokratov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*ankom9@gmail.com

Received March 27, 2018

Accepted August 15, 2018

Keywords: *detection of weak layers, mechanical properties, micro penetrometer, snow cover, snow cover stability, snow hardness, snowpack variability.*

Summary

The paper presents the results of studies aimed at investigation of the spatial and temporal variability of snow cover structure on the basis of strength values and its variations obtained by means of the high-resolution penetrometer SnowMicroPen. The possibilities of fast and independent from the observer identification of layers (including identification of weakened, potentially avalanche-dangerous layers) were estimated under the climatic conditions of Moscow and the Khibiny mountains. Horizontal areas with homogeneous underlying surface and vegetation were selected for the stratigraphic studies that made it possible to avoid a possible influence of slope relief and exposure from the obtained data on the spatial and temporal variability of the snow depth structure. The analysis of the information obtained in winter seasons 2014/15 and 2016/17 allowed constructing detailed schemes of the snow cover evolution at the Moscow site as well as assessing the inter-annual and intra-seasonal variability of its structure. After the SnowMicroPen data were recorded in the course of the field works carried out in winter 2015/16 on the Khibiny educational and scientific base of the Lomonosov Moscow State University (city of Kirovsk), the 10-meter trench on the same profile was described in details, and direct data on the snow cover structure were obtained. The strength values resulted from the above studies characterize the layers composed of crystals of various shapes and sizes, and they are considered as the first step to methodology of operational definition of the spatially-inhomogeneous stratigraphy and stability of snowpack without snowpit observations. The data analysis showed high spatial and temporal variability of the structure and properties of snow cover even at a homogeneous area, usually described by a single snowpit.

Citation: 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. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-473-485.

Поступила 27 марта 2018 г.

Принята к печати 15 августа 2018 г.

Ключевые слова: *выявление ослабленных слоёв, метаморфизм снежной толщи, неоднородность снежного покрова, пенетромметр, прочность снега, снежный покров.*

Представлены результаты исследований снежной толщи, полученные на двух полигонах в Москве и Хибинах. Исследована пространственная неоднородность снежной толщи и её изменения в течение зимнего сезона. Прочность снега определяли с помощью пенетromетра высокого разрешения SnowMicroPen. Построены и проанализированы схемы развития снежной толщи и её пространственная изменчивость.

Введение

Прогноз лавинной опасности требует оперативного получения и быстрой интерпретации информации о строении и свойствах снежного

покрова на склонах. Требуемые для этого характеристики снега и снежного покрова [1], а также возможные методы их получения [2] хорошо известны. Однако значительная пространственно-временная изменчивость строения и свойств

снежного покрова усложняет решение этой задачи. Репрезентативность выбранного места единичного шурфа для представления стратиграфии снежного покрова и структуры слагающих снежный покров слоёв снега на всей окружающей территории достаточно субъективна. Кроме того, выделение отдельных слоёв в снежной толще шурфа зависит от опыта наблюдателя, т.е. оно также субъективно. Для проходки большого числа шурфов требуются значительные временные затраты и физические усилия, однако часто это невозможно, особенно на лавоопасных участках.

Изменение строения и свойств снежного покрова в точке во времени сейчас достаточно хорошо описывается известными физическими закономерностями, вплоть до наличия определённых возможностей его оперативного моделирования на основе поступающей метеорологической информации [3–5]. Значительный прогресс достигнут также в нахождении закономерностей пространственной неоднородности снежного покрова. Изменчивость характеристик снежного покрова в пространстве, определяемая различиями метеорологических условий, представлялась в виде классификации и карт [6]. Результаты исследований позволили предложить «Классификацию снежного покрова по характеру эволюции» в качестве объяснения различий основных характеристик снежного покрова в масштабах климатических зон, природных комплексов, урочищ и фаций [7]. Определяемые климатическими условиями различия в стратиграфии снежной толщи были положены в основу лавинного районирования СССР [8]. На основе статистического анализа разрабатывались методики определения оптимальных интервалов измерения толщины и плотности снежного покрова на склонах для повышения репрезентативности получаемых данных [9]. Численно оценивалась и математически описывалась изменчивость характеристик снежного покрова, определяемая морфологией и микрорельефом склонов [10].

Более детальные исследования пространственной изменчивости дополнительно включают в себя исследование толщины отдельных слоёв, слагающих снежный покров, плотности снежного покрова, его механических свойств [11–14]. Установлено, что различия в стратиграфии снежной толщи в региональном масштабе могут воспроиз-

водиться через комбинацию ограниченного числа наблюдаемых и моделируемых метеорологических параметров [15], что в дальнейшем было использовано для создания алгоритма «лавинного климата» индивидуальных зим в локальном масштабе [16], вплоть до определения типов ожидаемых лавин и степени лавинной опасности [17]. Сделаны первые попытки комбинирования физических процессов в снежной толще [18] с изменчивостью их проявления в пространстве на локальном уровне [19, 20]. Основная проблема и нахождения методики интерполяции данных наблюдений в пространстве, и моделирования пространственной изменчивости – верификация получаемых результатов. Современные технологии позволяют с большой точностью воспроизводить пространственное распространение толщины снежного покрова [21], однако стратиграфия и свойства слоёв снега, слагающих снежный покров, пока ещё требуют прямых измерений.

В снеголавинных исследованиях наиболее востребованные характеристики снежного покрова, характеризующие его устойчивость на склонах в каждый момент времени, – послойная прочность снега и её изменчивость в пространстве [22]. Фактически, устойчивость снежного покрова определяется формой профиля прочности снега [23]. Существуют разные методики определения формы таких профилей, но так или иначе методологически они связаны с измерением сопротивления ледяной матрицы механическому воздействию [24–31]. В настоящее время всё большую популярность получает использование пенетromетра высокого разрешения SnowMicroPen (SMP) [32, 33], с помощью которого улучшается качество получаемых данных [34], что способствует развитию методики их интерпретации [35, 36].

SMP был приобретён для определения его технических возможностей в климатических условиях интересующих нас регионов (Хибины и Москва) и оценки «базовой» естественной пространственной неоднородности в стратиграфии снежного покрова на однородном с точки зрения геоморфологии и растительности участке, характеристики снежного покрова на котором обычно получают в результате описания единичного шурфа. Понимание возможного диапазона такой изменчивости необходимо при переходе на пространственную изменчивость, определяе-

мую различиями в морфометрии рельефа, ландшафтными условиями и микрометеорологией.

Методика исследований

SMP представляет собой устройство, позволяющее оперативно, с разрешением в 4 мкм, проводить и записывать данные измерения силы сопротивления ледяной матрицы вертикальному проникновению (с постоянной скоростью) шупа в снежную толщу (прочность снега) и амплитуды этой силы, т.е. предоставляя информацию о состоянии, стратиграфии и устойчивости снежной толщи [37]. Получение единичного вертикального профиля занимает минуты, что даёт возможность пройти и записать данные по значительному числу таких профилей за время, обычно затрачиваемое на описание одного шурфа. Использование прибора позволяет избежать субъективности, которая присуща визуальному обследованию шурфов различными наблюдателями, а также технических ошибок, вызываемых «человеческим фактором», среди которых: различные усилия, неточная регистрация значений, недобор проб и т.п. При этом получаемые характеристики не имеют прямой аналогии с обычно проводимыми в шурфах измерениями [1]. Алгоритмы интерпретации получаемых SMP-данных в «стандартные» характеристики снега достаточно успешно разрабатываются [35, 36], но и без их использования чётко и точно определяемые границы между слоями снега, слагающими снежный покров, позволяют делать выводы о пространственной неоднородности в стратиграфии и прочности слагающих снежный покров слоёв.

Работы выполнялись на площадках метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва) и Хибинской учебно-научной базы МГУ (г. Кировск) [38]. Исследования в Москве предусматривали регулярные измерения автоматическим датчиком толщины снежного покрова и периодические наблюдения за строением и развитием снежной толщи при помощи SMP с шагом 50 см горизонтальной линии протяжённостью 10 м (далее — трансекты), а также в шурфе, расположенном в её створе, с определением толщины слоёв, их плотности, температур, размера и формы зёрен. Всего было выпол-

нено шесть серий таких измерений в 2014/15 г. и восемь в 2016/17 г. (294 замера) [39, 40]. В Кировске работы проводили в марте 2016 г. и они были аналогичны московским измерения SMP вдоль трансекты длиной 10 м, с последующим разбитием и детальным описанием траншеи по той же линии. Таким образом, в Москве с помощью SMP-данных формировалась статистика по изменению стратиграфии снежного покрова в течение зимних сезонов и её пространственной изменчивости, тогда как в Кировске были получены прямые данные по пространственной изменчивости свойств слоёв снежной толщи и соответствующие им SMP-данные.

Изменчивость значений прочности оценивалась по вертикальным профилям и рассчитывалась для каждого слоя как отношение среднеквадратического отклонения значений в этом слое к их средней арифметической. Изменчивость прочности и других параметров снежного покрова вдоль трансекты исследовалась аналогичным образом, однако исходными данными служили осреднённые по слоям значения. Таким образом, для каждого слоя сравнивались средние значения прочности, полученные по 21 вертикальному профилю.

Результаты

Исследования показали, что изменчивость стратиграфии и свойств снежного покрова существенна даже в пределах ровной однородной площадки с одинаковой подстилающей поверхностью и растительностью как в условиях Москвы, так и в Хибинах (рис. 1–3). Значения коэффициента вариации прочности снега, определяемые SMP, по вертикальному профилю (внутри слоёв, слагающих снежный покров), как правило, выше, чем по продольному (вдоль трансекты) и в обоих случаях могут превышать 100%. Данные, полученные в Москве, указывают на значительную межгодовую изменчивость развития снежного покрова, включая даты установления максимальной толщины и разрушения, стратиграфию и распределение значений исследуемых параметров внутри толщи (см. рис. 1, а и рис. 2, а).

На основе анализа данных метеорологической обсерватории МГУ за период с 2011 по

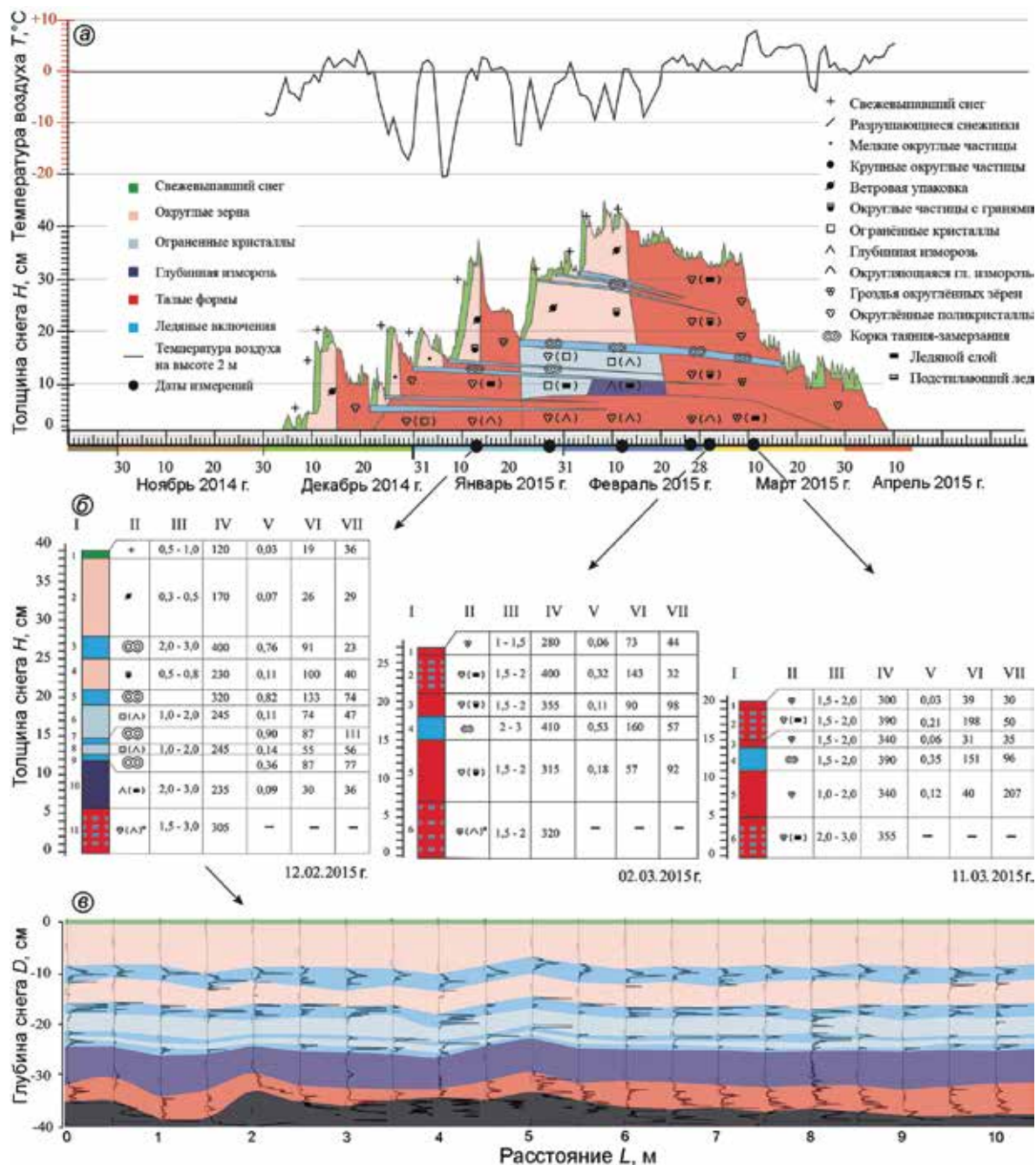


Рис. 1. Схемы временной и пространственной изменчивости характеристик снежного покрова в Москве зимой 2014/15 г.

Цветовые и символьные обозначения характеризуют морфологические классы кристаллов в соответствии с [1].
 а – схема временной изменчивости толщины и стратиграфии снежного покрова; б – примеры шурфов на разные даты с характеристиками выделенных слоёв; I – номер слоя; II – форма кристаллов; III – размер кристаллов, мм; IV – плотность снега в слое, kg/m^3 ; V – прочность снега в слое, Н; VI – вариация прочности по вертикальным профилям, %; VII – вариация прочности вдоль трансекты, %; в – пример схемы пространственной изменчивости стратиграфии и прочности снежного покрова. Чёрными линиями показаны профили значений прочности по данным пенетрометра SMP (21 замер). Ширина шкалы прочности для каждого профиля составляет 4 Н

Fig. 1. The scheme of spatial and temporal variability of the snow cover characteristics in Moscow in winter 2014/15.

The colors and symbols characterize the morphological classes of snow crystals according to [1].
 а – the scheme of the temporal variability of the height and stratigraphy of snow cover; б – the examples of the snowpits at different dates with the snow layers' characterization; I – the layer's No; II – the snow crystals' form; III – the snow crystals' size, mm; IV – the snow density in a layer, kg/m^3 ; V – snow hardness in a layer, N; VI – snow hardness variability in vertical profiles, %; VII – snow hardness variability along the transect, %; в – an example of the scheme of the spatial variability of the stratigraphy and hardness of the snowpack. The black lines show the profiles of the hardness values from SMP penetrometer (21 profile). The wide of the hardness scale for each profile is 4 N

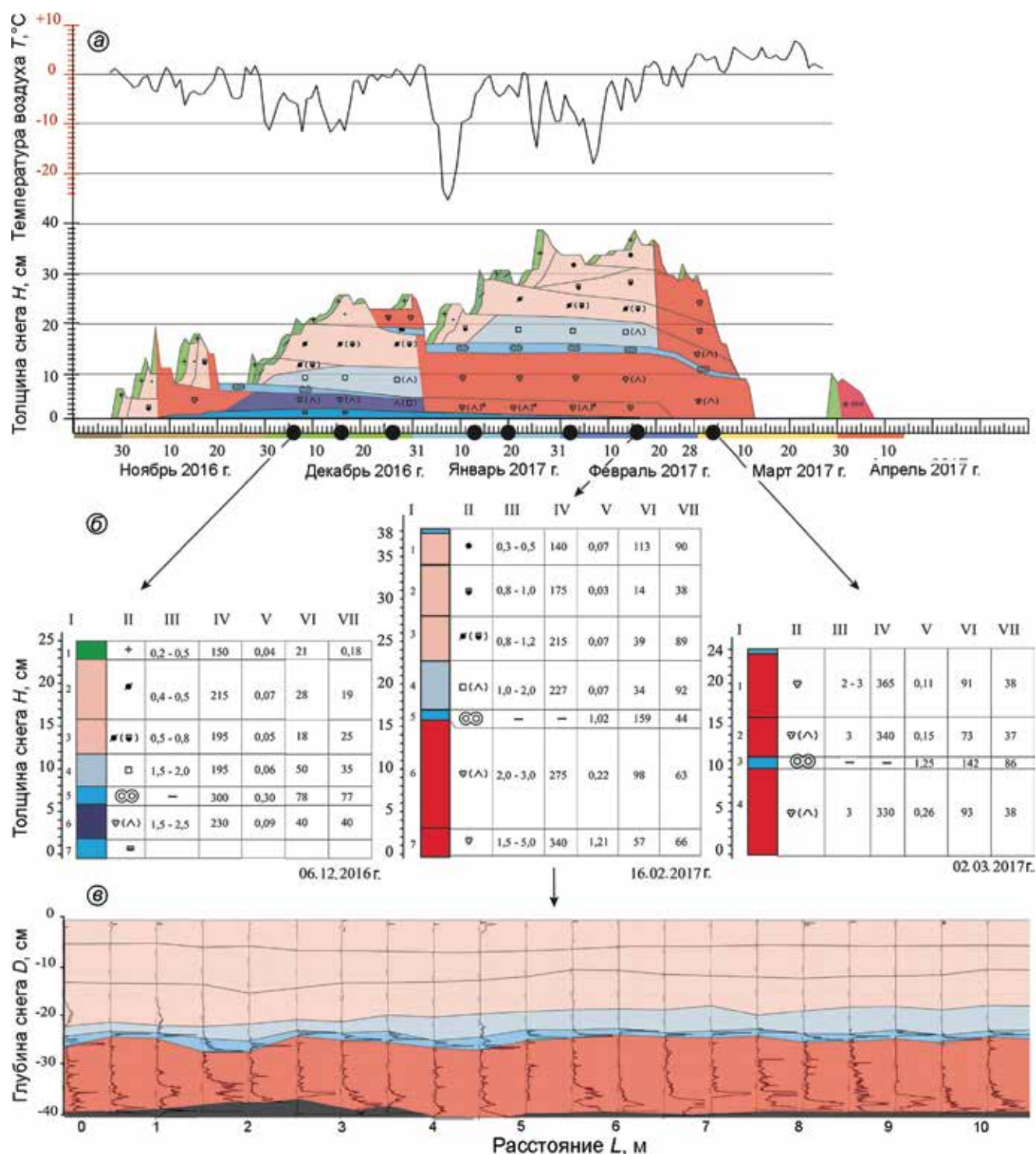


Рис. 2. Схемы временной и пространственной изменчивости характеристик снежного покрова в Москве зимой 2016/17 г. [39]:

a – схема временной изменчивости толщины и стратиграфии снежного покрова; *б* – примеры шурфов на разные даты с характеристиками выделенных слоёв; *в* – пример схемы пространственной изменчивости стратиграфии и прочности снежного покрова. Остальные усл. обозначения см. рис. 1

Fig. 2. The scheme of spatial and temporal variability of the snow cover characteristics in Moscow in winter 2016/17 [39]:

a – the scheme of the temporal variability of the height and stratigraphy of snow cover; *б* – the examples of the snowpits at different dates with the snow layers' characterization; *в* – an example of the scheme of the spatial variability of the stratigraphy and hardness of the snowpack. For the other symbols see Fig. 1

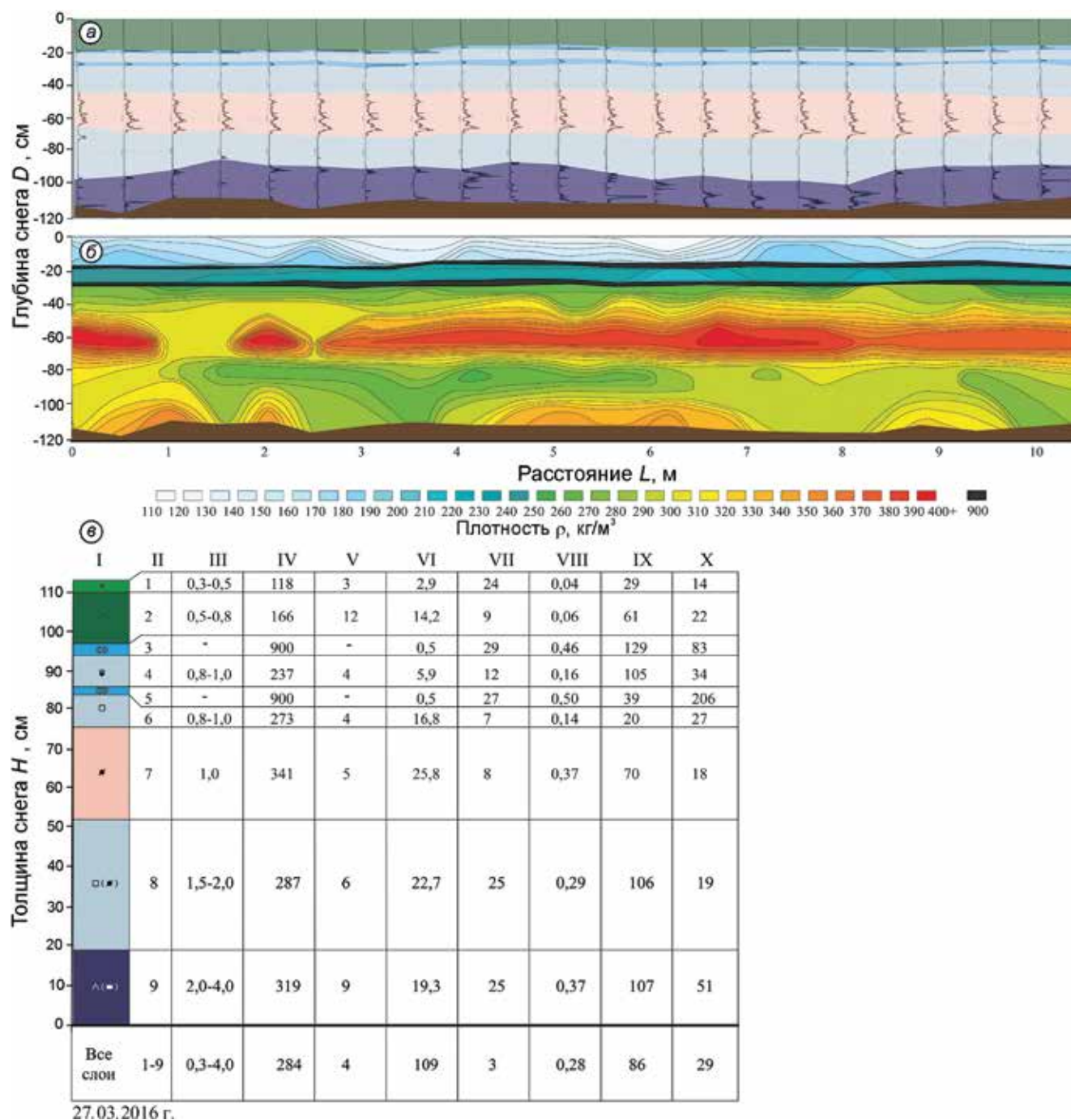


Рис. 3. Схемы пространственной изменчивости характеристик снежного покрова в траншее протяжённостью 10 м в Хибинах по данным на 27 марта 2016 г.:

a – схема изменчивости стратиграфии и прочности снежного покрова; b – схема изменчивости значений плотности снега внутри снежной толщи [40]; c – значения измеренных параметров, осреднённые по слоям. I – форма кристаллов; II – номер слоя; III – размер кристаллов, мм; IV – плотность снега в слое, кг/м³; V – вариация значений плотности вдоль траншеи, %; VI – толщина слоя, см; VII – вариация толщины слоя вдоль траншеи, %; VIII – прочность снега в слое, Н; IX – вариация прочности снега по вертикальным профилям, %; X – вариация прочности снега вдоль траншеи, %. Остальные усл. обозначения см. рис. 1

Fig. 3. Scheme of spatial variability of the snow cover characteristics in 10 m-length trench in Khibiny on March 27, 2016: a – the scheme of the spatial variability of the stratigraphy and hardness of the snowpack; b – the scheme of the variability of the snow density in the snowpack [40]; c – the values of the measured characteristics averaged per layer. I – the snow crystals' form; II – the layer's No; III – the snow crystals' size, mm; IV – the snow density in a layer, kg/m³; V – variability in of snow density along the trench; VI – a layer's thickness, cm; VII – variability of a snow layer's thickness along the trench; VIII – snow hardness in a layer, N; IX – snow hardness variability in vertical profiles, %; X – snow hardness variability along the trench, %. For the other symbols see Fig. 1

2017 г. установлено, что толщина и продолжительность залегания снежного покрова в 2014/2015 и 2016/2017 гг. имеют типичные значения, а процессы, строение, свойства и типы кристаллов снега характерны и репрезентативны для данного региона. Несмотря на то, что максимум снегонакопления пришёлся на один и тот же период, а продолжительность зимнего сезона была практически одинакова (136 и 126 дней для зим 2014/2015 и 2016/2017 гг. соответственно), наблюдался значительный сдвиг в периоде залегания снежного покрова. В сезоне 2014/15 г. устойчивый снежный покров сформировался на 36 дней раньше и разрушился на 26 дней раньше, чем в сезоне 2016/17 г. Метеорологические процессы и погодные явления, влияние на развитие снежной толщи в зимы 2014/15 и 2016/17 гг. оказались схожи, но их повторяемость и интенсивность значительно отличались, что нашло отражение в изменчивости строения и механических свойств связей между кристаллами снега. Частые оттепели, наблюдавшиеся зимой 2016/17 г., способствовали формированию неоднородной толщи с многочисленными ледяными корками, льдистыми включениями и повышенными, по сравнению с зимой 2014/15 г., значениями прочности и её коэффициентами вариации.

В климатических условиях Москвы в строении снежной толщи преобладали слои, сложенные кристаллами талых форм, а также слои уплотнённого мелкозернистого снега (см. рис. 1, 2). Типичны также слои с преобладанием кристаллов с огранкой и глубинной изморози, формирующиеся в результате температурно-градиентного метаморфизма в периоды резких и продолжительных похолоданий. Важную роль в процессе эволюции снежной толщи играют льдистые корки и смёрзшиеся слои, формирующиеся в периоды оттепелей и во многом определяющие интенсивность миграции воды внутри толщи. Их толщина может составлять от 1 до 30 мм. По мере развития снежной толщи форма, размер и связи между кристаллами значительно изменяются, что находит отражение в характере сигнала и значениях прочности, полученных с помощью SMP.

В начале зимы снежная толща отличалась пониженными значениями плотности, прочности и их коэффициентами вариации, что свидетельствует о её относительной однородно-

сти (см. рис. 1, б (12 февраля 2015 г.) и рис. 2, б (6 декабря 2016 г.)). Средние по шурфу значения плотности составили 210 кг/м^3 , прочности — 0,09 при коэффициентах вариации по вертикальным профилям и вдоль трансекты 36 и 31% соответственно. В период максимального снегонакопления толща характеризовалась сложной стратиграфией, обилием зёрен различных форм и неоднородностью связей между ними (см. рис. 1, б (2 марта 2015 г.) и рис. 2, б, в (16 февраля 2017 г.)). К этому времени толща значительно уплотнилась, средние значения достигли 255 кг/м^3 . При этом прочность связей между зёрнами в целом увеличилась до средних значений — около 0,23 Н. Повышение коэффициентов вариации до 61% по вертикальным профилям и 53% вдоль трансекты отражает увеличение неоднородности снежной толщи. В период весеннего снеготаяния плотность снега возрастает до средних значений 358 кг/м^3 (см. рис. 1, б (11 марта 2015 г.) и рис. 2, б (2 марта 2017 г.)). За счёт разрушения связей между кристаллами и появления в толще жидкой воды средняя прочность толщи снижается до 0,20 Н. Поскольку процесс таяния происходит неравномерно и осложняется ночными заморозками, сохраняется большая вариация значений. Осреднённые по толще коэффициенты вариации составляют 99 и 77% для вертикальных профилей и вдоль трансекты соответственно.

Исследование показало, что значения прочности и её коэффициентов вариации возрастают с увеличением плотности, льдистости и размера кристаллов слоя, в частности, с ростом числа циклов таяния—замерзания и степени фирнизации толщи. Наименьшие значения прочности и её коэффициентов вариации соответствуют однородным слоям рыхлого свежеснежавшего и осевшего мелкозернистого снега, а также типичны для слоёв с огранкой и глубинной изморози, не подвергавшихся воздействию положительных температур. Наибольшие осреднённые по слоям значения прочности и коэффициентов вариации характерны для слоёв, формирующихся в результате последовательных циклов таяния—замерзания, включая ледяные корки, слои крупнозернистого снега и смёрзшихся поликристаллов с ледяными включениями и конгломератами зёрен. В периоды снеготаяния значения прочности уменьшаются из-за разрушения свя-

зей между зёрнами, а вариации, напротив, возрастают. Достаточно высокие значения коэффициентов вариации наблюдаются также в слоях, сложенных кристаллами в начальной стадии огранки, что указывает на неравномерность развития температурно-градиентного метаморфизма даже в пределах визуально однородных слоёв.

Установлено также, что в пределах однородного, равнинного, с травянистой растительностью ландшафта полигона метеостанции МГУ наблюдается значительная вариация толщины слоёв. Коэффициент вариации толщины снежного покрова вдоль трансекты составил по результатам всех измерений от 5 до 9% в зависимости от даты измерений. При этом коэффициенты вариации толщины отдельных слоёв оказалась значительно больше — от 12 до 46%. Высокие значения коэффициентов вариации наблюдались в сильно льдистых слоях, ледяных корках и слоях глубинной изморози.

Данные, полученные в Хибинах, характеризуют снежную толщу в период максимума снегонакопления и описывают стратиграфию, типичную для данного региона и его климатических условий. На основе этих данных построены схемы распределения измеряемых по вертикальным профилям и вдоль траншеи параметров, а также оценена их пространственная изменчивость (см. рис. 3). Толща характеризовалась значительно большей, по сравнению с московскими данными, средней толщиной и плотностью и отличалась преобладанием очень плотных и твёрдых слоёв ветрового уплотнения, меньшим числом корок и ледяных включений внутри снежной толщи. Это — результат частых сильных метелей и редкой повторяемости зимних оттепелей в данном регионе. Характерны также слои разрыхления, сложенные огранёнными кристаллами и свидетельствующие о высокой интенсивности процесса температурно-градиентного метаморфизма в условиях сильных и продолжительных морозов. Такому процессу были подвержены даже слои с плотной ветровой упаковкой кристаллов, в результате уменьшались их прочностные свойства, формировались неустойчивые и потенциально лавиноопасные слои.

Как правило, в таких климатических условиях участки разрыхления формируются между слоями уплотнения, причём интенсивность пе-

рекристаллизации, а соответственно и толщина, и прочность слоёв разрыхления значительно отличаются от точки к точке, делая задачу оценки устойчивости снега на склонах нетривиальной. Толщина снежного покрова в шурфе по данным 20 измерений изменялась от 101 до 114 см, при среднем значении 109 см (см. рис. 3, а, б). Коэффициент вариация значений вдоль траншеи составил 3,5%. Средневзвешенные значения плотности по результатам всех измерений — 284 кг/м³ (при коэффициенте вариации вдоль траншеи 3,6%), прочности — 0,26 Н (при коэффициентах вариации 29% вдоль траншеи и 86% по вертикальным профилям). Отметим, что коэффициенты вариации этих показателей по слоям были значительно выше, чем осреднённые по всей толще (см. рис. 3, в).

Как и в Москве, наименьшие значения прочности и вариации соответствуют однородным слоям рыхлого свежевывапавшего и мелкозернистого снега низкой плотности, а также слоям с огранкой и глубинной изморози. Слои метелевого уплотнения отличаются высокими значениями плотности и прочности. Значения коэффициентов вариации прочности вдоль трансекты достаточно малы. При этом наблюдаются повышенные коэффициенты вариации прочности по вертикальным профилям (внутри слоёв). Наибольшие значения плотности, прочности и коэффициентов вариации характеризуют сильно льдистые слои и ледяные корки. Значения коэффициентов вариации прочности по вертикальным профилям (внутри слоёв) свидетельствуют о более высокой, чем в Москве, неоднородности снежного покрова, формирующегося в условиях частых метелей Хибин. Поскольку интенсивность аккумуляции осадков и сила ветра могут меняться значительно на протяжении короткого промежутка времени, наблюдается сложная стратиграфия с обилием тонких слоёв разной степени уплотнённости. Вариации толщины, прочности и плотности слоёв, отражающих изменчивость погодных явлений в зимний сезон, значительны в пределах однородного ландшафта, а коэффициенты вариации значений прочности внутри слоёв (по вертикальным профилям) оказалась значительно выше, чем вдоль трансекты (см. рис. 3, в). Значительна также пространственная изменчивость водного эквивалента снега, что может иметь

значение при определении водозапаса территории на основе «точечных» измерений [41].

Выводы

Полученные данные показывают, что прибор SMP может быть использован для независимой от наблюдателя идентификации ослабленных и потенциально лавиноопасных слоёв, а определённые с его помощью границы между слоями, слагающими снежный покров, помогают оценить пространственную изменчивость, в том числе и водного эквивалента снежного покрова. В ходе работ в Москве и Хибинах отмечены факторы, лимитирующие возможности использования прибора SMP в подобных климатических условиях. В Москве основные сложности были связаны с фиксацией верхней и нижней границ снежной толщи. Несмотря на высокую чувствительность прибора, плотность и прочность верхнего слоя свежеснежного покрова оказывается крайне низкой и не позволяет чётко определить верхнюю границу снежного покрова. Аналогичная проблема с фиксацией нижней границы подстилающего слоя возникает в том случае, когда снежный покров лежит на талом грунте: попадание датчика в этот промежуток вносит значительную погрешность в полученные данные. Сам датчик забивается грунтом, осложняя дальнейшее использование.

В условиях Хибинах характерно формирование очень твёрдых слоёв с ветровым уплотнением, поэтому мощности прибора бывает недостаточно, чтобы пробить их. В результате возникают погрешности, связанные с недобором данных о слоях, расположенных ниже. Кроме того, использовать прибор трудно во время метелей (их повторяемость в Хибинах очень высока), поскольку в течение нескольких минут происходит обледенение прибора и он либо полностью выходит из строя, либо даёт значительные погрешности.

Методические сложности интерпретации полученных данных связаны с отсутствием чёткого алгоритма автоматического выделения слоёв в снежной толще или, вернее, генерализации слоёв, представляемых SMP-данными до уровня, сравнимого с результатами шурфования. На данном этапе выделение слоёв ведётся на основе

экспертной оценки в процессе изучения шурфа, а затем границы соответствующих визуально определённых корок и слоёв уточняются по «перегибам» на графике. Таким образом, наиболее актуальные задачи, связанные с использованием прибора, — поиск решения, позволяющего проводить автоматическую идентификацию слоёв при помощи математического аппарата, а также определение сочетаний параметров, характеризующих тот или иной тип снега в конкретных климатических условиях и позволяющих быстро идентифицировать потенциально лавиноопасные слои. Статистический анализ полученных в ходе исследований данных позволяет определить значения ряда параметров и оценить их изменчивость для слоёв, характеризующихся преобладанием того или иного типа кристаллов. Данный метод особенно актуален для снеголавинных исследований, поскольку позволяет реконструировать строение снежной толщи, оперативно выделять слои с различными свойствами и выявлять ослабленные, потенциально лавиноопасные слои без проходки шурфов.

Анализ полученных данных показал высокую пространственную и временную изменчивость строения и свойств снежного покрова как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Коэффициенты вариации значений прочности отдельных слоёв могут достигать 100% в обоих направлениях даже между двумя соседними точками измерения (с интервалом 50 см). Это свидетельствует о сильном влиянии таких факторов, как воздействие ветра и жидкой воды на развитие снежной толщи. 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 растительностью.

Наибольшие значения прочности и её коэффициентов вариации характерны для неоднородных, сильно льдистых, смёрзшихся крупнозернистых слоёв, в то время как минимальные их значения типичны для однородных слоёв мелкозернистого и свежеснежного слабометаморфизованного снега, а также для слоёв разрыхления и глубинной изморози. Слои метелевого уплотнения имеют высокую плотность и

повышенные коэффициенты вариации значений прочности по вертикальным профилям, что отражает их сложную стратиграфию. Установлено, что изменчивость значений прочности по вертикальным профилям намного выше, чем по продольным. Вариация толщины и прочности снега, осреднённая по всей толще, меньше вариации этих показателей, рассчитанной для каждого слоя в отдельности.

Литература

1. 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. М.: Ин-т географии РАН, Гляциологическая ассоциация, 2012. (Материалы гляциол. исследований. 2012. № 2). 80 с.
2. Pirazzini R., Leppänen L., Picard G., Lopez-Moreno J.I., Marty C., Macelloni G., Kontu A., von Lerber A., Tanis C.M., Schneebeli M., de Rosnay P., Arslan A.N. European in-situ snow measurements: Practices and purposes // *Sensors*. 2018. V. 18. № 7. 2016. doi: 10.3390/s18072016.
3. Durand Y., Giraud G., Brun E., Mérindol L., Martin E. A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting // *Journ. of Glaciology*. 1999. V. 45. № 151. P. 469–484. doi: 10.1017/S0022143000001337.
4. Hirashima H., Nishimura K., Yamaguchi S., Sato A., Lehning M. Avalanche forecasting in a heavy snowfall area using the snowpack model // *Cold Regions Science and Technology*. 2008. V. 51. № 2–3. P. 191–203. doi: 10.1016/j.coldregions.2007.05.013.
5. Schirmer M., Lehning M., Schweizer J. Statistical forecasting of regional avalanche danger using simulated snow-cover data // *Journ. of Glaciology*. 2009. V. 55. № 193. P. 761–768. doi: 10.3189/002214309790152429.
6. Котляков В.М. Снежный покров Антарктиды и его роль в современном оледенении материка (Результаты исследований по программе МГГ. IX раздел. Гляциология, № 7). М.: Изд-во АН СССР, 1961. 246 с.
7. Коломыц Э.Г. Снежный покров горнотаёжных ландшафтов севера Забайкалья. М.-Л.: Наука, 1966. 183 с.
8. Лавиноопасные районы Советского Союза / Ред. Г.К. Тушинский. М.: Изд-во Московского ун-та, 1970. 199 с.
9. Коновалов В.Г., Чиркова А.А. Изучение пространственной изменчивости плотности и высоты се-

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-17-00104 «Лавинный и селевой риск на территории России: оценка, прогноз и меры по его снижению».

Acknowledgements. The research was supported by the Russian Science Foundation grant № 16-17-00104 «Snow avalanches and debris flows risk at the territory of Russia: estimation, forecast and mitigation measures».

References

1. Fierz Ch., Armstrong R.L., Durand Y., Etchevers P., Greene E., McClung D.M., Nishimura K., Satyawali P.K., Sokratov S.A. The international classification for seasonal snow on the ground (UNESCO, IHP–VII, Technical Documents in Hydrology, No 83; IACS contribution No 1). Paris: UNESCO/Division of Water Sciences, 2009: viii+80 p.
2. Pirazzini R., Leppänen L., Picard G., Lopez-Moreno J.I., Marty C., Macelloni G., Kontu A., von Lerber A., Tanis C.M., Schneebeli M., de Rosnay P., Arslan A.N. European in-situ snow measurements: Practices and purposes. *Sensors*. 2018, 18 (7): 2016. doi: 10.3390/s18072016.
3. Durand Y., Giraud G., Brun E., Mérindol L., Martin E. A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting. *Journ. of Glaciology*. 1999, 45 (151): 469–484. doi: 10.1017/S0022143000001337.
4. Hirashima H., Nishimura K., Yamaguchi S., Sato A., Lehning M. Avalanche forecasting in a heavy snowfall area using the snowpack model. *Cold Regions Science and Technology*. 2008, 51 (2–3): 191–203. doi: 10.1016/j.coldregions.2007.05.013.
5. Schirmer M., Lehning M., Schweizer J. Statistical forecasting of regional avalanche danger using simulated snow-cover data. *Journ. of Glaciology*. 2009, 55 (193): 761–768. doi: 10.3189/002214309790152429.
6. Kotlyakov V.M. The snow cover of the Antarctic and its role in the present-day glaciation of the continent. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1966: 256 p.
7. Kolomytz E.G. *Snezhnyi pokrov gornotayozhnykh landshaftov severa Zabaikalia*. Snow cover of the mountain taiga landscapes of the North of the Transbaikalia. Moscow–Leningrad: Nauka, 1966: 183 p. [In Russian].
8. *Lavinoopasnye raiony Sovetskogo Soyuza*. Avalanche-endangered territories of the Soviet Union. Ed. G.K. Tushinskii. Moscow: Moscow University, 1970: 199 p. [In Russian].
9. Konovalov V.G., Chirkova A.A. Investigation of spatial variability of density and height of seasonal snow cover in mountains. *Inzhenernaya glyatsiologiya: Trudy I*

- зонного снежного покрова в горах // Инженерная гляциология: Тр. I Всес. координац. совещ. по инженерной гляциологии (6–9 апреля 1970 г., г. Кировск). Апатиты: АН СССР, 1973. С. 86–92.
10. Голубев В.Н. Некоторые закономерности пространственной неоднородности свойств и строения снежного покрова на склонах гор // Тр. Второго Всесоюз. совещ. по лавинам. Янгиабат, май 1985 г. Л.: Гидрометеиздат, 1987. С. 220–228.
 11. Канаев Л.А. Об изменчивости свойств снега // Тр. Среднеазиатского регионального науч.-исслед. гидромет. ин-та. 1969. Вып. 44 (59). С. 25–42.
 12. Schweizer J., Kronholm K., Jamieson J.B., Birkeland K.W. Review of spatial variability of snowpack properties and its importance for avalanche formation // Cold Regions Science and Technology. 2008. V. 51. № 2–3. P. 253–272. doi: 10.1016/j.coldregions.2007.04.009.
 13. Черноус П.А., Барашев Н.В., Федоренко Ю.В. Изменчивость характеристик снега и образование лавин // Лёд и Снег. 2010. № 3 (111). С. 27–36.
 14. Черноус П.А., Селиверстов Ю.Г., Сучков В.Е. Влияние характеристик снега на лавинообразование // Лёд и Снег. 2015. № 2 (130). С. 53–59. doi: 10.15356/2076-6734-2015-2-53-59.
 15. 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.
 16. Mock C.J., Birkeland K.W. Snow avalanche climatology of the western United States mountain ranges // Bulletin of the American Meteorological Society. 2000. V. 81. № 10. P. 2367–2392. doi: 10.1175/1520-0477(2000)081<2367:SACOTW>2.3.CO;2.
 17. Shandro B., Haegeli P. Characterizing the nature and variability of avalanche hazard in western Canada // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2018. V. 18. № 4. P. 1141–1158. doi: 10.5194/nhess-18-1141-2018.
 18. Bartelt P., Lehning M. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning. Part I: numerical model // Cold Regions Science and Technology. 2002. V. 35. № 3. P. 123–145. doi: 10.1016/S0165-232X(02)00074-5.
 19. Клименко Е.С. Моделирование снежного покрова на лавиноопасном склоне для оценки его устойчивости // ГеоРиск. 2011. № 1. С. 52–57.
 20. Bavay M., Lehning M., Jonas T., Löwe H. Simulations of future snow cover and discharge in Alpine headwater catchments // Hydrological Processes. 2009. V. 23. № 1. P. 95–108. doi: 10.1002/hyp.7195.
 21. Bühler Y., Adams M.S., Stoffel A., Boesch R. Photogrammetric reconstruction of homogenous snow surfaces in alpine terrain applying near-in-Vsesoyuznogo koordinatsionnogo soveshchaniya po inzhenernoy glyatsiologii (6–9 aprelya 1970g., Kirovsk). Engineering glaciology: Proc. of the I All-Union coordination conf. on engineering glaciology (April 6–9, 1970, Kirovsk). Apatity: USSR Academy of Sciences, 1973: 86–92. [In Russian].
 10. Golubev V.N. Some regularities of spatial inhomogeneity of properties and stratigraphy of snow cover on the mountain slopes. Trudy Vtorogo Vsesoyuznogo soveshchaniya po lavinam: Yangiabad, may 1985 g. Proc. of the Second All-Union conf. on avalanches: Yangiabad, May 1985. Lenin-grad: Gidrometeoizdat, 1987: 220–228. [In Russian].
 11. Kanaev L.A. On variability of snow properties. Trudy Sredneaziatskogo regional'nogo nauchno-issledovatel'skogo gidrometeorologicheskogo instituta. Proc. of the Central Asian regional scientific-research hydrometeorological institute. 1969, 44 (59): 25–42. [In Russian].
 12. Schweizer J., Kronholm K., Jamieson J.B., Birkeland K.W. Review of spatial variability of snowpack properties and its importance for avalanche formation. Cold Regions Science and Technology. 2008, 51 (2–3): 253–272. doi: 10.1016/j.coldregions.2007.04.009.
 13. Chernous P.A., Barashev N.V., Fedorenko Yu.V. Variability of snow characteristics and formation of avalanches. Led i Sneg. Ice and Snow. 2010, 3 (111): 27–36. [In Russian].
 14. Chernous P.A., Seliverstov Y.G., Suchkov V.E. Snow variability effect upon avalanching. Led i Sneg. Ice and Snow. 2015, 2 (130): 53–59. doi: 10.15356/2076-6734-2015-2-53-59. [In Russian].
 15. 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.
 16. Mock C.J., Birkeland K.W. Snow avalanche climatology of the western United States mountain ranges. Bulletin of the American Meteorological Society. 2000, 81 (10): 2367–2392. doi: 10.1175/1520-0477(2000)081<2367:SA COTW>2.3.CO;2.
 17. Shandro B., Haegeli P. Characterizing the nature and variability of avalanche hazard in western Canada. Natural Hazards and Earth System Sciences. 2018, 18 (4): 1141–1158. doi: 10.5194/nhess-18-1141-2018.
 18. Bartelt P., Lehning M. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning. Part I: Numerical model. Cold Regions Science and Technology. 2002, 35 (3): 123–145. doi: 10.1016/S0165-232X(02)00074-5.
 19. Klimenko E.S. Modeling snow cover on an avalanche slope for its stability estimation. GeoRisk. Georisk. 2011, 1: 52–57. [In Russian].
 20. Bavay M., Lehning M., Jonas T., Löwe H. Simulations of future snow cover and discharge in Alpine headwater catchments. Hydrological Processes. 2009, 23 (1): 95–108. doi: 10.1002/hyp.7195.
 21. Bühler Y., Adams M.S., Stoffel A., Boesch R. Photogrammetric reconstruction of homogenous snow sur-

- frared UAS imagery // Intern. Journ. of Remote Sensing. 2017. V. 38. № 8–10. P. 3135–3158. doi: 10.1080/01431161.2016.1275060.
22. *Schweizer J., Jamieson J.B., Schneebeli M.* Snow avalanche formation // Reviews of Geophysics. 2003. V. 41. № 4. 1016. doi: 10.1029/2002RG000123.
 23. *Schweizer J., Wiesinger Th.* Snow profile interpretation for stability evaluation // Cold Regions Science and Technology. 2001. V. 33. № 2–3. P. 179–188. doi: 10.1016/S0165-232X(01)00036-2.
 24. *Dowd T., Brown R.L.* A new instrument for determining strength profiles in snow cover // Journ. of Glaciology. 1986. V. 32. № 111. P. 299–301. doi: 10.3189/S0022143000015628.
 25. *Епифанов В.П.* Пенетромтр – новый прибор для определения физико-механических свойств снега // МГИ. 1990. Вып. 68. С. 188–192.
 26. *Birkeland K.W., Hansen K.J., Brown R.L.* The spatial variability of snow resistance on potential avalanche slopes // Journ. of Glaciology. 1995. V. 41. № 137. P. 183–190. doi: 10.3189/S0022143000017871.
 27. *Pielmeier Ch., Schneebeli M.* Snow stratigraphy measured by snow hardness and compared to surface section images // Intern. snow science workshop 2002: Penticton, BC, Canada, September 29 – October 4, 2002 / Ed. J. Stevens. 2002. P. 345–352.
 28. *Kronholm K., Schneebeli M., Schweizer J.* Spatial variability of micropenetration resistance in snow layers on a small slope // Annals of Glaciology. 2004. V. 38. P. 202–208. doi: 10.3189/172756404781815257.
 29. *Pielmeier Ch., Marshall H.-P.* Rutschblock-scale snowpack stability derived from multiple quality-controlled SnowMicroPen measurements // Cold Regions Science and Technology. 2009. V. 59. № 2–3. P. 178–184. doi: 10.1016/j.coldregions.2009.06.005.
 30. *Höller P., Fromm R.* Quantification of the hand hardness test // Annals of Glaciology. 2010. V. 51 (54). P. 39–44. doi: 10.3189/172756410791386454.
 31. *Hagenmuller P., Pilloix Th.* A new method for comparing and matching snow profiles, application for profiles measured by penetrometers // Frontiers in Earth Science. 2016. V. 4. № 52. doi: 10.3389/feart.2016.00052.
 32. *Schneebeli M., Johnson J.B.* A constant-speed penetrometer for high-resolution snow stratigraphy // Annals of Glaciology. 1998. V. 26. P. 107–111. doi: 10.1017/S0260305500014658.
 33. *Schneebeli M., Pielmeier C., Johnson J.B.* Measuring snow microstructure and hardness using a high resolution penetrometer // Cold Regions Science and Technology. 1999. V. 30. № 1–3. P. 101–114. doi: 10.1016/S0165-232X(99)00030-0.
 34. *van Herwijnen A.* Experimental analysis of snow micropenetrometer (SMP) cone penetration in homogeneous snow layers // Canadian Geotechnical Journ. faces in alpine terrain applying near-infrared UAS imagery. Intern. Journ. of Remote Sensing. 2017, 38 (8–10): 3135–3158. doi: 10.1080/01431161.2016.1275060.
 22. *Schweizer J., Jamieson J.B., Schneebeli M.* Snow avalanche formation. Reviews of Geophysics. 2003, 41 (4): 1016. doi:10.1029/2002RG000123.
 23. *Schweizer J., Wiesinger Th.* Snow profile interpretation for stability evaluation. Cold Regions Science and Technology. 2001, 33 (2–3): 179–188. doi: 10.1016/S0165-232X(01)00036-2.
 24. *Dowd T., Brown R.L.* A new instrument for determining strength profiles in snow cover. Journ. of Glaciology. 1986, 32 (111): 299–301. doi: 10.3189/S0022143000015628.
 25. *Epifanov V.P.* Penetrometer – a new instrument for determining physics-mechanical properties of snow. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1990, 68: 188–192. [In Russian].
 26. *Birkeland K.W., Hansen K.J., Brown R.L.* The spatial variability of snow resistance on potential avalanche slopes. Journ. of Glaciology. 1995, 41 (137): 183–190. doi: 10.3189/S0022143000017871.
 27. *Pielmeier Ch., Schneebeli M.* Snow stratigraphy measured by snow hardness and compared to surface section images. Ed. J. Stevens. Intern. Snow Science Workshop 2002: Penticton, BC, Canada, Sept. 29–Oct. 4, 2002. 2002: 345–352.
 28. *Kronholm K., Schneebeli M., Schweizer J.* Spatial variability of micropenetration resistance in snow layers on a small slope. Annals of Glaciology. 2004, 38: 202–208. doi: 10.3189/172756404781815257.
 29. *Pielmeier Ch., Marshall H.-P.* Rutschblock-scale snowpack stability derived from multiple quality-controlled SnowMicroPen measurements. Cold Regions Science and Technology. 2009, 59 (2–3): 178–184. doi: 10.1016/j.coldregions.2009.06.005.
 30. *Höller P., Fromm R.* Quantification of the hand hardness test. Annals of Glaciology. 2010, 51 (54): 39–44. doi: 10.3189/172756410791386454.
 31. *Hagenmuller P., Pilloix Th.* A new method for comparing and matching snow profiles, application for profiles measured by penetrometers. Frontiers in Earth Science. 2016, 4: 52. doi: 10.3389/feart.2016.00052.
 32. *Schneebeli M., Johnson J.B.* A constant-speed penetrometer for high-resolution snow stratigraphy. Annals of Glaciology. 1998, 26: 107–111. doi: 10.1017/S0260305500014658.
 33. *Schneebeli M., Pielmeier C., Johnson J.B.* Measuring snow microstructure and hardness using a high resolution penetrometer. Cold Regions Science and Technology. 1999, 30 (1–3): 101–114. doi: 10.1016/S0165-232X(99)00030-0.
 34. *van Herwijnen A.* Experimental analysis of snow micropenetrometer (SMP) cone penetration in homogeneous snow layers. Canadian Geotechnical Journ. 2013, 50 (10): 1044–1054. doi: 10.1139/cgj-2012-0336.

2013. V. 50. № 10. P. 1044–1054. doi: 10.1139/cgj-2012-0336.
35. Satyawali P.K., Schneebeli M., Pielmeier C., Stucki T., Singh A.K. Preliminary characterization of Alpine snow using SnowMicroPen // Cold Regions Science and Technology. 2009. V. 55. № 3. P. 311–320. doi: 10.1016/j.coldregions.2008.09.003.
 36. Kaur S., Satyawali P.K. Estimation of snow density from SnowMicroPen measurements // Cold Regions Science and Technology. 2017. V. 134. P. 1–10. doi: 10.1016/j.coldregions.2016.11.001.
 37. Комаров А.Ю., Селиверстов Ю.Г., Глазовская Т.Г., Турчанинова А.С. Методические аспекты использования пенетрометра snowmicropen при снеголавинных исследованиях // Геогр. исследования молодых учёных в регионах Азии: Материалы Всерос. молодёжной конф. с междунар. участием (Барнаул–Белокуриха, 7–11 ноября 2016 г.) / Ред. О.В. Останин. Барнаул: Пять плюс, 2016. С. 171–176.
 38. Комаров А.Ю., Селиверстов Ю.Г., Сократов С.А., Гребенников П.Б. Изучение пространственно-временной неоднородности снежной толщи с использованием пенетрометра Snowmicropen // III Междунар. симпозиум «Физика, химия и механика снега»: Сб. докладов, ч. I. Южно-Сахалинск, 2–6 октября 2017 г. / Ред. Н.А. Казаков. Южно-Сахалинск: Изд-во «КАНО», 2017. С. 64–68.
 39. 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 / Ред. О.А. Шиловцева. М.: МАКС Пресс, 2016. С. 201–210.
 40. Комаров А.Ю., Селиверстов Ю.Г., Сократов С.А., Гребенников П.Б. Изучение пространственно-временной неоднородности снежной толщи на площадке метеорологической обсерватории МГУ зимой 2016/2017 гг. // Эколого-климатические характеристики атмосферы в 2016 г. по данным метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова / Ред. Е.И. Незваль, И.В. Сошникова. М.: МАКС Пресс, 2017. С. 190–202.
 41. Komarov A.Yu., Seliverstov Yu.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. V. 67. № 1. P. 110–112. doi: 10.2478/johh-2018-0016.
 35. Satyawali P.K., Schneebeli M., Pielmeier C., Stucki T., Singh A.K. Preliminary characterization of Alpine snow using SnowMicroPen. Cold Regions Science and Technology. 2009, 55 (3): 311–320. doi: 10.1016/j.coldregions.2008.09.003.
 36. Kaur S., Satyawali P.K. Estimation of snow density from SnowMicroPen measurements. Cold Regions Science and Technology. 2017, 134: 1–10. doi: 10.1016/j.coldregions.2016.11.001.
 37. Komarov A.Yu., Seliverstov Yu.G., Glazovskaya T.G., Turchaninova A.S. Methodological aspects of the use of the penetrometer SnowMicroPen in snow avalanche studies. Young Scientists' Geographical Research in the Regions of Asia: Materials of All-Russian Youth Conf. with Intern. Participation (Barnaul – Belokurikha, 7–11 November 2016). Ed. O.V. Ostanin. Barnaul: Five plus, 2016: 171–176. [In Russian].
 38. Komarov A.Yu., Seliverstov Yu.G., Sokratov S.A., Grebennikov P.B. Assessment of the spatial and temporal variability of a snowpack using a SMP penetrometer. Proc. of the III Intern. Symposium on «Physics, Chemistry and Mechanics of Snow». Pt. I. Yuzhno-Sakhalinsk, 2–6 October, 2017. Ed. N.A. Kazakov. Yuzhno-Sakhalinsk: «KANO», 2017: 64–68. [In Russian].
 39. Komarov A.Yu., Seliverstov Yu.G., Sokratov S.A., Grebennikov P.B. Investigation of the spatial-temporal variability of snowpack by use of the high-resolution penetrometer snowmicropen at the ground of the Meteorological Observatory of MSU. *Ekologo-klimaticheskie kharakteristiki atmosfery v 2015 g. po dannym meteorologicheskoy observatorii MGU imeni M.V. Lomonosova*. Environmental and climate characteristics of the atmosphere in 2015 according to the measurements of the Meteorological Observatory of Moscow State University. Ed. O.A. Shilovtseva. Moscow: MAKS Press, 2016: 201–210. [In Russian].
 40. Komarov A.Yu., Seliverstov Yu.G., Sokratov S.A., Grebennikov P.B. Investigation of the spatial-temporal variability of the snowpack at the ground of the Meteorological Observatory of MSU in Winter 2016/2017. *Ekologo-klimaticheskie kharakteristiki atmosfery v 2016 g. po dannym meteorologicheskoy observatorii MGU imeni M.V. Lomonosova*. Environmental and climate characteristics of the atmosphere in 2016 according to the measurements of the Meteorological Observatory of Moscow State University. Eds.: E.I. Nezval', I.V. Soshinskaya. Moscow: MAKS Press, 2017: 190–202. [In Russian].
 41. Komarov A.Yu., Seliverstov Yu.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.