

20. Изучение пространственно-временной неоднородности снежной толщи с использованием пенетрометра высокого разрешения SnowMicroPen на территории метеорологической обсерватории МГУ.

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

Географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, НИЛ снежных лавин и селей

20.1. Вступление

Представляются результаты исследований снежной толщи, выполненных зимой 2014/15 года на площадке метеорологической обсерватории МГУ на Воробьевых горах. Исследования включали в себя регулярные замеры автоматическим датчиком толщины снежного покрова с дискретностью 1 раз в 15 минут (Москва), периодические наблюдения за строением снежной толщи в шурфе с определением температуры и плотности снега, измерения показателя сопротивления снега датчику пенетрометра высокого (4 Мкм) разрешения SNOWMICROPEN. Измерения сопротивления датчику выполнялись через 50 см по линии протяженностью 10 м.

Исследование направлено на изучение пространственно-временной изменчивости строения и свойств снежного покрова по вертикальному и горизонтальному профилям, автоматизированное выявление слоев по значениям твердости и ее дисперсии и обнаружение ослабленных слоев с определением их параметров. Установлено, что различия в толщине и взаиморасположении слоёв снежной толщи, сложенных различными типами снега (неоднородность снежной толщи) существенны даже в пределах одного равнинного ландшафта.

Актуальность использования подобных технологий связана необходимостью оперативного получения максимально возможного количества информации о строении и свойствах снежного покрова на склонах и быстрой ее интерпретации для прогноза лавинной опасности в условиях значительной пространственно-временной неоднородности и изменчивости строения и свойств снежного покрова.

20.2. Методика

Изучению пространственно-временной изменчивости строения и свойств снежного покрова посвящены работы Л.А. Канаева, А.А. Чирковой, П.А. Черноуса и других авторов, в которых рассматриваются такие показатели как толщина снежного покрова и его отдельных слоев, плотность, сопротивление на сдвиг. Получение таких данных требует значительных временных и физических затрат на рытье шурфов и проведение измерений. Изучение твердости снега и ее изменчивости с использованием таких приборов как зонд Хефели было достаточно редким. К тому же, прибор позволял выявить только крупные слои внутри снежной толщи. Кроме того, следует принимать во внимание, что погрешности, связанные с «человеческим фактором» и субъективностью оценки могут быть значительны.

Новые возможности для изучения твердости снега дает разработанный в Швейцарском институте снеголавинных исследований (SLF) Snowmicropen (SMP) (Рис. 20.1, 20.2).

После установки прибора на поверхность снега движимый электромотором с постоянной скоростью щуп с датчиком сопротивления приложенному воздействию на конце фиксирует и записывает на флэш-карту значения через каждые 4 микрометра. Измерение прибором исключает ошибки, определяемые "человеческим фактором", такие как применение различных усилий, неверная регистрация значений, недобор пробы и пр.

Сопоставление полученных в ходе измерений значений с типовыми для слоев с определенной плотностью и размером зерен позволяет по установленным в Альпах закономерностям реконструировать без копания шурфов строение снежной толщи и, что особенно важно в снеголавинных исследованиях, выявлять лавиноопасные слои.



Рисунок 20.1. Щуп с датчиком сопротивления SMP.



Рисунок 20.2. Прибор SMP в работе

Цель настоящего исследования - апробация прибора SnowMicroPen в отличных от альпийских физико-географических условиях, выявление соответствия определенных средних значений измеряемого параметра и дисперсий определенным слоям в снежной толще, выявление в ней лавиноопасных слоев. Методика использования прибора заключается в периодических линейных (через определенные интервалы) измерениях. Происходит постепенное накопление массива информации и его обработка в специальных программах. Параллельно выполняются измерения толщины снежного покрова и отдельных его слоев, их плотности и размера зерен в шурфах и траншеях.

20.3. Результаты

По данным наблюдений в метеорологической обсерватории МГУ в Москве зимой 2014-2015 года снежный покров установился в первых числах декабря, а к 12 февраля достиг своей максимальной толщины 42 см, после чего началась его деградация, связанная с преобладанием положительных температур. Как видно на схеме (Рис. 20.3), период с декабря по середину февраля характеризовался периодическими оттепелями, в результате которых происходила активная трансформация снежной толщ с формированием новых горизонтов и различных структурных неоднородностей. Характерными чертами развития снежной толщ являются увеличение размера кристаллов, формирование многочисленных структурных неоднородностей (линз, корок, агрегатов и прочее), связанных с просачиванием жидкой воды во время зимних оттепелей и перекристаллизацией в периоды антициклональной активности.

Во время оттепелей рыхлая толща свежего снега насыщалась водой, формируя слои повышенной плотности при последующем промерзании.

Зимой 2014-2015 гг. на площадке метеорологической обсерватории МГУ был выполнен ряд из 6 последовательных наблюдений за строением снежной толщ в шурфе с определением температуры и плотности снега, измерением показателя сопротивления снега датчику. Рассмотрены такие показатели как строение и толщина снежного покрова и его отдельных слоев, значения плотности слоев, размер кристаллов в каждом из них.

Как видно на схемах (рис. 20.3, 20.4), в течение зимы происходило постепенное увеличение плотности снежной толщ и рост размера кристаллов. Так, в январе (13 и 28) значения плотности варьировали в пределах от 120 до 260 кг/м³, со средними значениями около 200 кг/м³. Преобладал мелкозернистый (МЗ) рыхлый оплавленный снег с размером

кристаллов менее 1 мм, к концу месяца начал формироваться горизонт глубоинной изморози, проявляться огранка, размер кристаллов в нижней части толщи увеличился до 2 и более мм.

В феврале (12 и 27) толща претерпела значительные изменения — появились многочисленные структурные неоднородности (ледяные включения и корки, зоны разрыхления), средний размер кристаллов увеличился до 2 см — стал преобладать среднезернистый (СЗ) снег. Увеличился разброс значений плотности — от 120 до 400 кг/м³, средняя плотность толщи также значительно возросла (250 кг/м³). В марте перекристаллизация продолжалась — преобладали сильнольдистые слои крупнозернистого (КЗ) снега, значения плотности варьировали от 200 до 400 кг/м³, при среднем значении около 300-320 кг/м³.

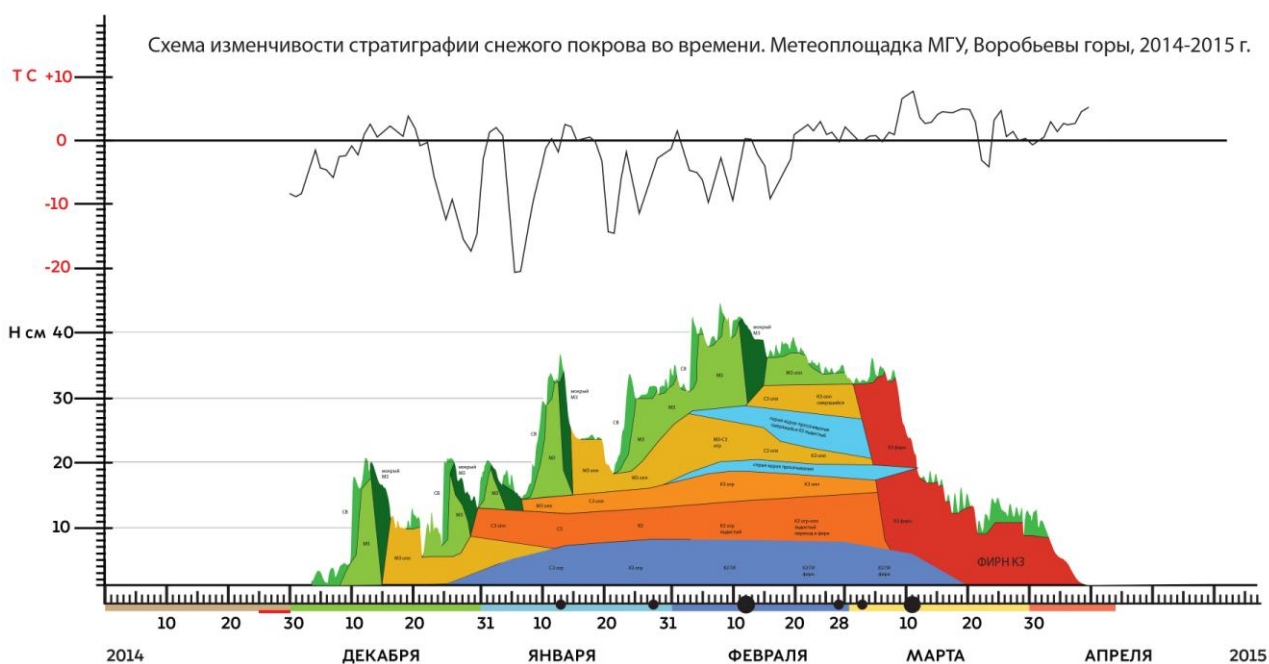


Рисунок 20.3. Схема изменчивости стратиграфии снежного покрова во времени. Площадка метеообсерватории МГУ. Зима 2014/2015 гг.

Было выполнено сравнение средних значений сопротивления и коэффициентов вариации для замеров в точке №1. Описание изменения значений сопротивления приложенному воздействию датчика представляется для периода максимального снегонакопления (12 февраля) и для периода, когда происходило активное таяние снежной толщи (11 марта).

Стратиграфия и плотность снежного покрова. Воробьевы горы, 2014-2015 гг.

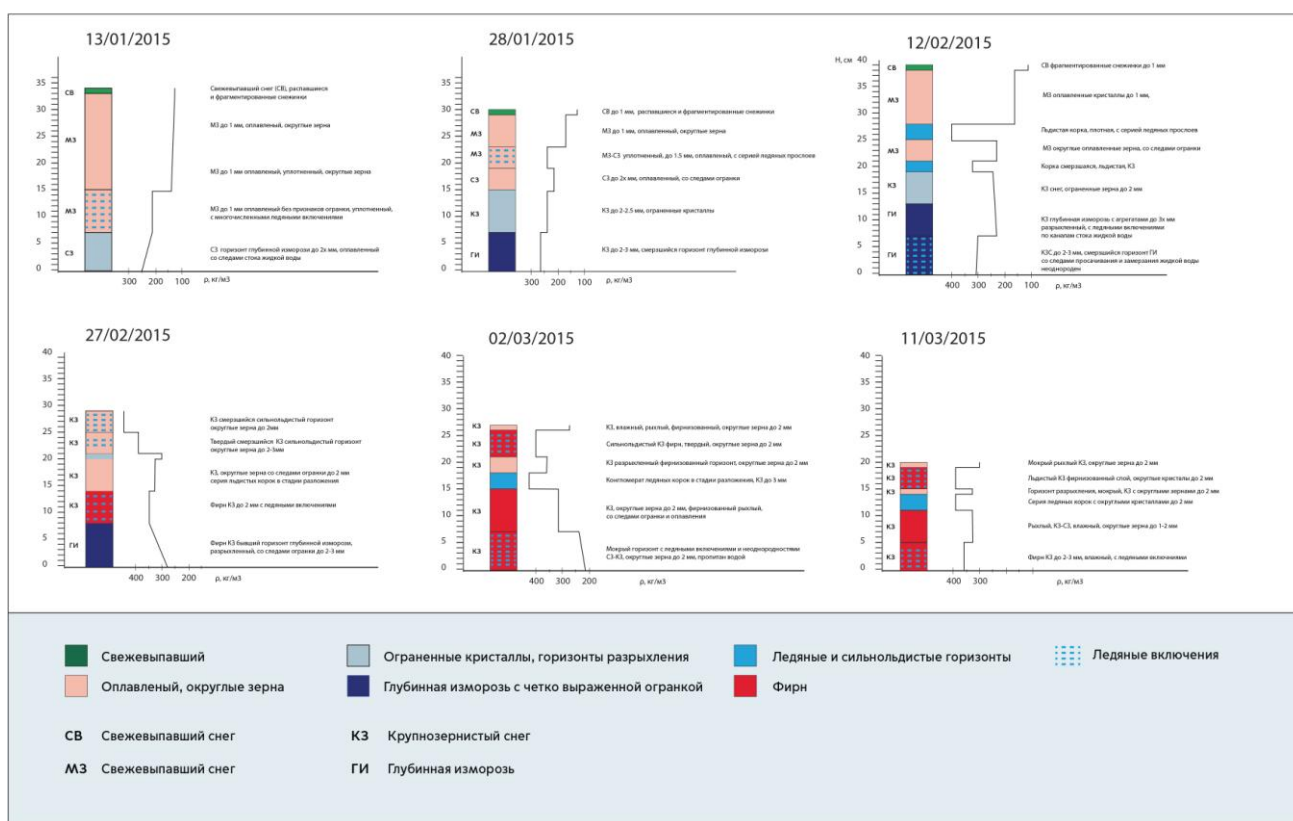


Рисунок 20.4. Стратиграфия и плотность снежного покрова на различные даты зимы 2014/2015 гг.

Определено, что наибольшие значения сопротивления и коэффициента вариации характерны для крупнозернистых и льдильдистых слоев, в то время как минимальные значения сопротивления и вариации характерны для однородных слоев мелкозернистого и свежевыпавшего слабо метаморфизированного снега (Рис. 20.5, 20.6).

Так, 12/02 было выделено 8 слоев с различными свойствами. Усредненные по слоям значения сопротивления варьируют от 0,02 до 1,4 Н (0,62 Н если не брать в расчет прослой льда) (для измерений 12/02/15) и от 0,04 до 0,13 (для измерений 11/03/15). Причем наименьшие значения соответствуют однородным слоям СВ и МЗ снега (0,02 для слоя №1, 0,08 для слоя №2 для 12/02) (0,04 для слоя №1 для 11/03), а также участкам разрыхления и ГИ (0,08 для слоя №7 ГИ 12/02 или 0,07 для слоя №5 бывшая глубинная изморозь (ГИ) 11/03). Максимальные значения сопротивления наблюдаются в льдильдистых слоях (0,36 для слоя №6 и 0,62 для слоя 8 (12/02)) (0,13 для слоя №2 (11/03)) (Рис. 20.7).

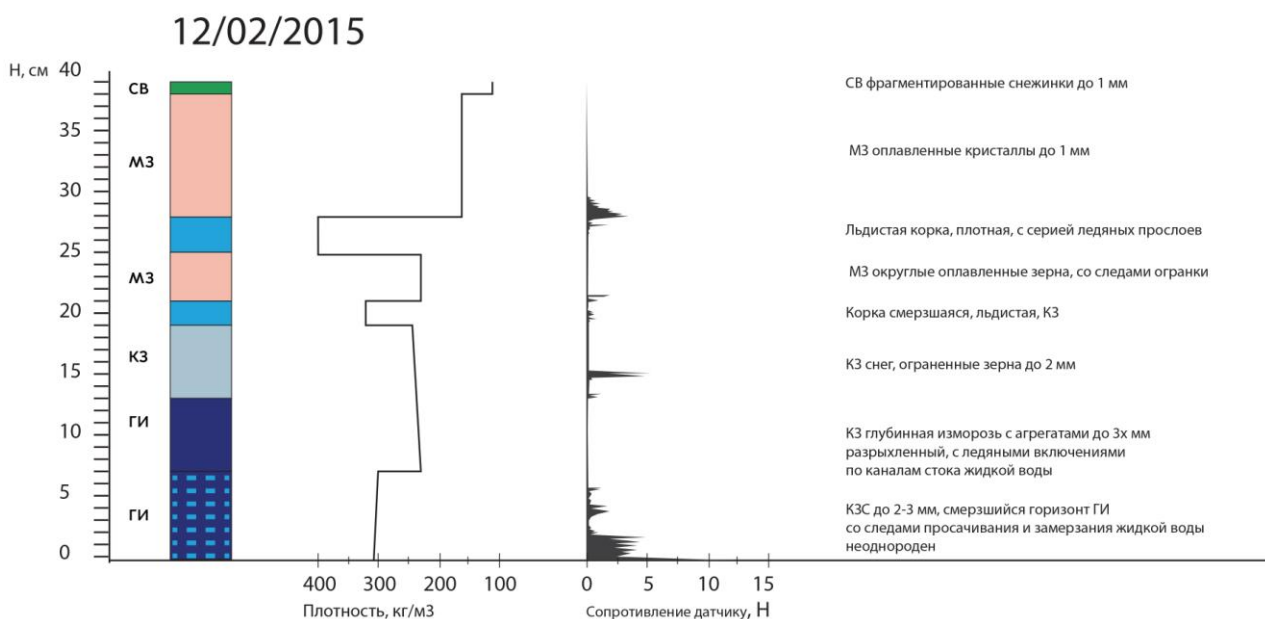


Рисунок 20.5. Данные SnowMicroPen в точке №1 12/02/15

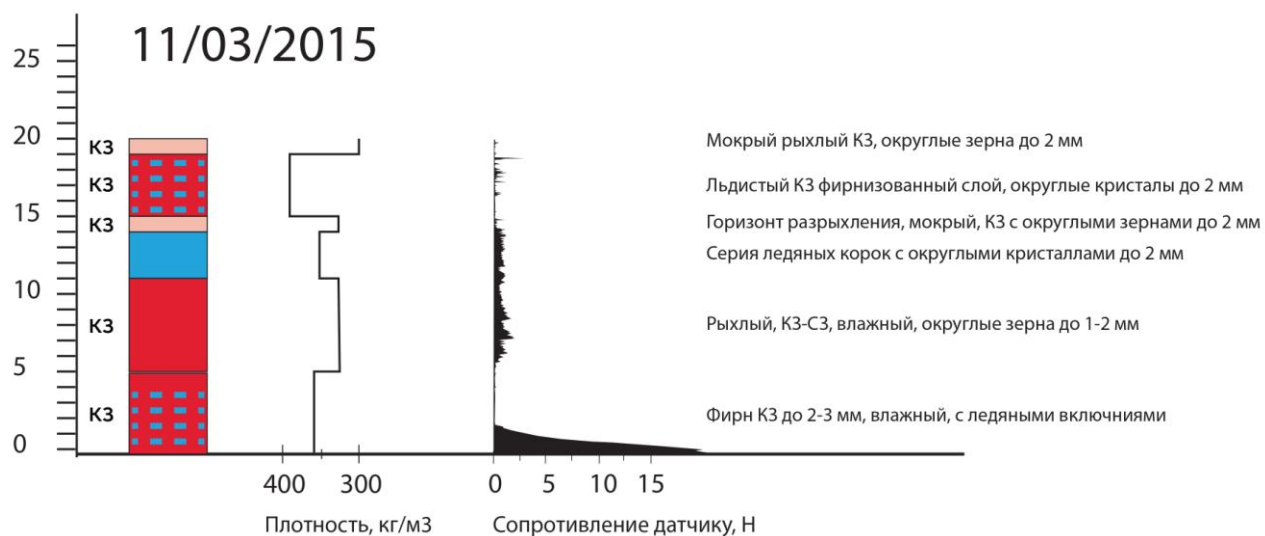


Рисунок 20.6. Данные SnowMicroPen в точке №1 11/03/15

В целом же, значение сопротивления увеличивается в соответствии с увеличением льдистости (и неоднородностей повышенной плотности) и размера кристаллов.

Аналогичным образом выглядит распределение коэффициента вариации — разброс значений максимален для сильнольдистых K3 слоев с многочисленными включениями и агрегатами (№6,8 для 12/02 и №2,6 для 11/03) и минимальны для однородных рыхлых горизонтов (№2,7 (0,3) для 12/02 и №3 (0,05) слой тонкий и довольно однородный) №5 (0,15) для 11/03).

12/02/15

| № слоя | Толщина слоя, см | Сопротивление, Н | Коэффициент вариации |
|--------|------------------|------------------|----------------------|
| 1 | 0,7 | 0,022 | 1,0 |
| 2 | 9,2 | 0,086 | 0,3 |
| 3 | 3,9 | 1,008 | 1,0 |
| 4 | 4,6 | 0,129 | 0,5 |
| 5 | 3,9 | 1,389 | 1,5 |
| 6 | 5,5 | 0,364 | 1,4 |
| 7 | 7,0 | 0,082 | 0,3 |
| 8 | 5,8 | 0,623 | 0,9 |

11/03/15

| Слой | Толщина слоя, см | Сопротивление, Н | Коэффициент вариации |
|------|------------------|------------------|----------------------|
| 1 | 0,8 | 0,04 | 0,25 |
| 2 | 4,2 | 0,13 | 1,48 |
| 3 | 1,0 | 0,08 | 0,05 |
| 4 | 3,3 | 0,10 | 1,05 |
| 5 | 3,3 | 0,07 | 0,15 |
| 6 | 3,3 | 0,10 | 0,41 |

Рисунок 20.7. Сравнение данных измерений SMP 12/02/15 и 11/03/15. Точка №1
(зона шурфа)

Были установлены следующие закономерности:

коэффициент вариации меньше там, где размеры кристаллов одинаковые, больше где разные;

чем больше разница в размере зерен, тем больше вариация;

чем тоньше слой, тем меньше вариация;

сопротивление меньше в слоях, где нет инородных включений и маленький размер кристаллов.

20.4. Пространственная изменчивость показателей сопротивления и вариации

В период максимального снегонакопления 12.02.15 были выполнены линейные (с интервалом 0,5 м) измерения сопротивления датчику. Они показали, что в верхней части (0-5см) снежной толщи (рыхлый снег низкой плотности без ледяных включений и неоднородностей) наблюдались значения в интервале от 0,02 до 0,07 Н, в средней (20-25

см — СЗ и КЗ снег с огранкой) — от 0,11 до 0,58 Н, в нижней (35-40 см — ГИ с ледяными включениями) от 0,06 до 10,7 Н. Такие значения свидетельствуют о значительной пространственной неоднородности в нижних горизонтах снежной толщи, в то время как верхний слой 0-5 см достаточно однороден по своим свойствам (Рис. 20.8).

Величина коэффициента вариации значительна, несмотря на визуальную однородность исследуемых слоев, и составляет от 0,1 до 0,6 для слоя 0-5 см (рыхлый снег низкой плотности без ледяных включений и неоднородностей), от 0,4 до 1,7 для слоя 20-25 см (СЗ-КЗ с огранкой) и от 0,1 до 1,2 для слоя 35-40 (ГИ с ледяными включениями).

| 0-5 см | | | 5-10 см | | | 10-15 см | | |
|---------|------------------|----------------------|---------|------------------|----------------------|----------|------------------|----------------------|
| Профиль | Сопротивление, Н | Коэффициент вариации | Профиль | Сопротивление, Н | Коэффициент вариации | Профиль | Сопротивление, Н | Коэффициент вариации |
| 69 | 0,069 | 0,4 | 69 | 0,095 | 0,2 | 69 | 0,817 | 1,2 |
| 70 | 0,068 | 0,4 | 70 | 0,110 | 0,8 | 70 | 0,390 | 1,1 |
| 71 | 0,058 | 0,6 | 71 | 0,093 | 0,3 | 71 | 0,566 | 1,7 |
| 72 | 0,071 | 0,6 | 72 | 0,103 | 0,2 | 72 | 0,743 | 1,3 |
| 73 | 0,066 | 0,5 | 73 | 0,098 | 0,1 | 73 | 0,615 | 1,2 |
| 74 | 0,056 | 0,4 | 74 | 0,089 | 0,1 | 74 | 0,397 | 1,0 |
| 75 | 0,053 | 0,4 | 75 | 0,086 | 0,0 | 75 | 0,511 | 1,1 |
| 76 | 0,022 | 0,1 | 76 | 0,046 | 0,4 | 76 | 0,074 | 0,3 |
| 77 | 0,023 | 0,4 | 77 | 0,464 | 1,1 | 77 | 0,134 | 1,5 |
| 78 | 0,048 | 0,4 | 78 | 0,081 | 0,3 | 78 | 0,521 | 1,2 |

| 15-20 см | | | 20-25 см | | | 25-30 см | | |
|----------|------------------|----------------------|----------|------------------|----------------------|----------|------------------|----------------------|
| Профиль | Сопротивление, Н | Коэффициент вариации | Профиль | Сопротивление, Н | Коэффициент вариации | Профиль | Сопротивление, Н | Коэффициент вариации |
| 69 | 1,002 | 1,9 | 69 | 0,264 | 1,6 | 69 | 0,326 | 1,5 |
| 70 | 0,266 | 1,8 | 70 | 0,111 | 0,6 | 70 | 0,098 | 0,5 |
| 71 | 0,335 | 2,1 | 71 | 0,119 | 0,6 | 71 | 0,214 | 1,2 |
| 72 | 0,437 | 2,3 | 72 | 0,173 | 0,4 | 72 | 0,195 | 1,3 |
| 73 | 0,284 | 2,1 | 73 | 0,275 | 1,3 | 73 | 0,106 | 0,2 |
| 74 | 0,274 | 2,4 | 74 | 0,175 | 1,3 | 74 | 0,199 | 1,5 |
| 75 | 0,543 | 2,4 | 75 | 0,582 | 1,7 | 75 | 0,557 | 1,9 |
| 76 | 0,388 | 1,3 | 76 | 0,109 | 1,4 | 76 | 0,057 | 0,2 |
| 77 | 0,834 | 1,6 | 77 | 0,536 | 2,0 | 77 | 0,074 | 1,3 |
| 78 | 0,160 | 1,3 | 78 | 0,123 | 0,6 | 78 | 0,360 | 2,0 |

| 30-35 см | | | 35-40 см | | |
|----------|------------------|----------------------|----------|------------------|----------------------|
| Профиль | Сопротивление, Н | Коэффициент вариации | Профиль | Сопротивление, Н | Коэффициент вариации |
| 69 | 0,082 | 0,3 | 69 | 0,603 | 0,8 |
| 70 | 0,195 | 0,9 | 70 | 0,127 | 0,8 |
| 71 | 0,100 | 0,2 | 71 | 0,203 | 1,1 |
| 72 | 0,117 | 0,2 | 72 | 0,206 | 0,6 |
| 73 | 0,238 | 0,9 | 73 | 3,132 | 0,8 |
| 74 | 0,095 | 0,0 | 74 | 0,313 | 1,2 |
| 75 | 0,223 | 0,8 | 75 | 0,276 | 0,5 |
| 76 | 0,358 | 1,8 | 76 | 0,059 | 0,1 |
| 77 | 0,920 | 1,6 | 77 | 10,776 | 0,8 |
| 78 | 0,112 | 0,1 | 78 | 0,540 | 1,2 |

Рисунок 20.8. Данные измерений SMP 12.02.15. Интервал измерений 0,5 м.

Подтверждается сделанный ранее вывод о том, что наибольшие значения вариации характерны для сильнольдистых КЗ слоев с неоднородным строением, наименьшие — для однородных МЗ слоев

Аналогичные измерения были выполнены 11/03/15 (Рис. 20.9). Они показали, что в верхней части (0-5см) снежной толщи (рыхлый КЗ снег) наблюдались значения в интервале от 0,09 до 0,26 Н (К от 1,5 до 3,1), в средней (10-15см — КЗ-СЗ фирнизованный снег) — от 0,02 до 0,85 Н (К от 0,2 до 1,5), в нижней (35-40см — ГИ с ледяными включениями) от 0,02 до 0,65 Н (К от 0,4 до 2,0). Такие значения свидетельствуют о значительной пространственной неоднородности во всех горизонтах снежной толщи в

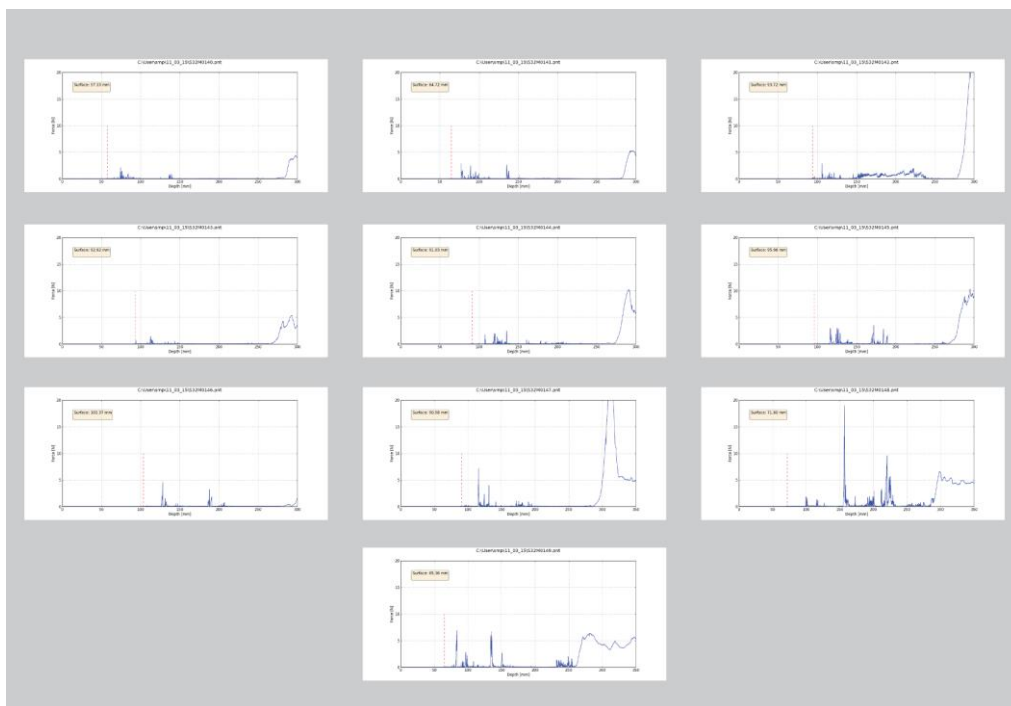


Рисунок 20.9. Данные измерений SMP 11.03.15. Интервал измерений 0,5 м.

период снеготаяния, что может быть связано с появлением многочисленных структурных неоднородностей при просачивании жидкой воды и еще промерзании в толще.

Средние для 11/03/15 значения толщины снежного покрова составили от 18 до 22,6 см.

Усредненные для всей толщ значения сопротивления составили от 0,08 до 0,45 Н, показателя коэффициента вариации — от 1 до 3.

20.5. Выводы

1. Хотя измерения твердомера дискретны (4 мкм), но они охватывают всю снежную толщу независимо от толщины отдельных субъективно выделенных слоев
2. Частота измерений твердости, осуществляемых твердомером, позволяет установить более детальные по сравнению с другими характеристиками изменения их по профилю - то есть можно выделить гораздо большее число слоев, нежели чем традиционными методами
3. Изменчивость значений сопротивления от слоя к слою (коэффициент вариации слоев) больше изменчивости их толщины и плотности.
4. Наибольшие значения сопротивления характерны для сильнольдистых

слоев КЗ снега и наименьшие - для однородных МЗ слоев единовременного накопления

5. Наибольшее значение коэффициента вариации наблюдаются в слоях со структурными неоднородностями в виде линз, корок, прослоев и пр, а также в слоях с высокой вариацией размера кристаллов. Соответственно, минимальные значения характерны для однородных рыхлых МЗ слоев единовременного накопления

Исследования проводились при финансовой поддержке проекта Российского Научного Фонда (РНФ) 16-17-00104.