Комаров А. Ю., Селиверстов Ю. Г., Глазваская Т. Г., Турчанинова А. С.

Московский государственный университет им. Ломоносова, лаборатория снежных лавин и селей

ankom9@gmail.com

Методические аспекты использования пенетрометра SNOWMICROPEN при снеголавинных исследованиях.

Вступление

Исследования стратиграфии снежного покрова актуальны для многих сфер хозяйственной деятельности: для снеголавинных исследований, инженерных изысканий, сельского хозяйства и пр. Совершенствование методов прогноза, оценки рисков и точности расчетов напрямую связаны с качеством и количеством полученной из первоисточника информации. Этому в значительной мере способствует разработанный в Швейцарском институте снеголавинных исследований (SLF) прибор SnowMicroPen.

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. Отличительной чертой данного прибора является его высокая точность (4мкм) и скорость работы. Кроме того, прибор спроектирован таким образом, что позволяет работать при весьма низких температурах, до -40 С. Однако, его использование может быть затруднено рядом побочных факторов, поэтому его необходимо тестировать в различных климатических и погодных условиях.

Данная статья представляет собой попытку оценить технические возможности прибора и показать основные плюсы и минусы на конкретных примерах. В частности, в работе используются выводы, полученные в результате работ российских исследователей, выполненных с использованием прибора SnowMicroPen.

История создания и актуальность

Идея создания прибора для прибора для оперативного измерения механических характеристик снежного покрова была выдвинута основателями Швейцарского института снеголавинных исследований (SLF) в 1930х годах (Bader et al, 1939). Созданный ими прибор Rammsonde используется в снеголавинных исследованиях по сей день, причем в практически неизмененной форме. Уже в то время разработчики прибора понимали, что он имеет ряд слабых сторон, в первую очередь – возможность зафиксировать только наиболее мощные слои снега. Поскольку обычно снежная толща имеет сложную стратиграфию и включает многочисленные тонкие слои, которые не фиксировались данным прибором, появилась необходимость развить технологию для получения более точных данных.

Активное развитие цифровых технологий в 1980х годах побудило исследователей (Dowd and Brown 1986) разработать пенетрометр, который позволил последовательно фиксировать сопротивление датчику, что значительно повысило точность измерений. Тем не менее, проблема недостаточного разрешения прибора сохранялась.

Необходимость оценить пространственную неоднородность снежной толщи и увеличить точность измерений мотивировала ученых (Schneebeli and Johnson 1998) создать прибор “SnowMicroPen" (SMP). Этот прибор отличался от предыдущих значительно более высоким разрешением и позволил идентифицировать в снежной толще слои толщиной менее 2 мм. Кроме того, прибор позволил установить корреляционные связи между силой сопротивления зонду и прочностью связей между кристаллами снега, что стало важным прорывом в исследованиях подобного рода. В 1997 году в холодной лаборатории CRREL на Аляске ученые сделали интересное наблюдение. Они обнаружили, что сила сигнала получаемого с интервалом 4 мкм зависит от типа снега. Таким образом, прибор способен объективно оценить микроструктуру снежной толщи. Поскольку интерпретация полученных данных сложна и может значительно отличаться для территорий с разным климатом и характером снегонакопления, исследования, связанные с использованием этого прибора весьма актуальны.

Принцип работы

Процесс получения информации о микроструктуре снега происходит следующим образом: прибор устанавливается на поверхность снежной толщи, затем движимый мотором со скоростью около 2 см в секунду металлический щуп с чувствительным сенсором на конце пронизывает толщу. Движение происходит до тех пор, пока не будет достигнута заданная пользователем глубина, либо предельная сила сопротивления. Данные о силе сопротивления датчику считываются через каждые 4 мкм (0,04 см) и записываются на флэш-карту. Сила сопротивления датчику суммируется из сил сжатия снега и разрыва связей между кристаллами. Таким образом, каждому типу снега должен быть свойственен особый тип сигнала, получаемого с датчика (Рис 1). Это позволяет

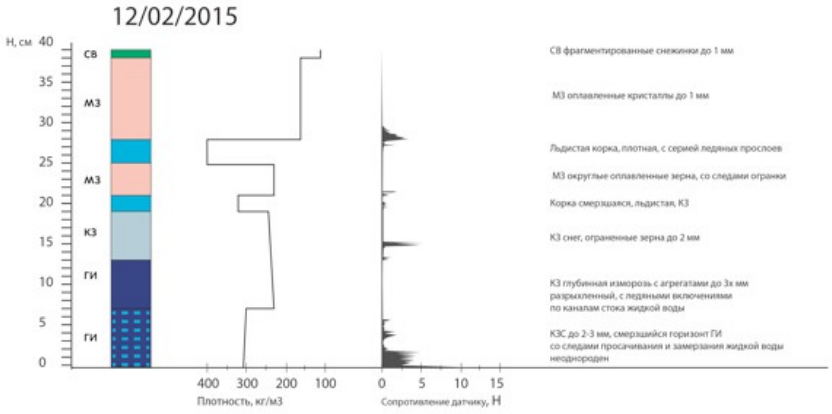

Рис.1 *Пример использования прибора во время работ по изучению пространственно-временной неоднородности снежной толщи в Москве (Комаров, 2016).*

технологии находить широкое применение в снеголавинных исследованиях и другой хозяйственной деятельности, связанной с изучением снежного покрова.

Измерение прибором исключает ошибки, определяемые "человеческим фактором", как то - 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 связям реконструировать строение снежной толщи без копания шурфов и, что особенно важно в снеголавинных исследованиях, выявлять лавиноопасные слои.

Устройство прибора

Рис. 2 *Общий вид прибора SMP. Состоит из механической части (щуп и датчик) и панели управления.*

Рис. 3 *Чувствительный наконечник датчика позволяет получить данные с разрешением 4 мкм.*

Прибор SMP состоит из двух основных составляющих – механической части и панели управления (Рис. 2, 3). Механическая часть включает в себя мотор и щуп с пьезоэлектрическим датчиком сопротивления давлению на конце (Рис. 3). Особое устройство мотора позволило достигнуть высокой пространственной точности, благодаря чему естественные вариации в скорости проникновения датчика сквозь слои различной плотности, например, сильно льдистые и плотные, могут быть компенсированы. Во избежание попадания снега внутрь прибора и его поломки, прибор оснащен специальными щеточками, которые очищают щуп от снега при его движении. Для фиксации прибора на поверхности снега во время измерений используются специальные распорки наподобие лыжных палок, высота которых может регулироваться.

Панель управления прибора представляет собой небольшой компьютер. На экране отображаются основные функции, а в процессе измерения выводятся значения глубины и силы сопротивления датчику, фиксируемые в данный момент времени. Параллельно происходит последовательная запись полученной информации. Дополнительные меню, отображаемые на экране, позволяют

вручную задать глубину измерения и другие параметры. Контроллер содержит литий-полимерный аккумулятор, который рассчитан на один день измерений СМП (около 8 часов). Дополнительный внешний аккумулятор может быть подключен к блоку контроллера, что особенно актуально при эксплуатации прибора в очень холодных условиях (до -40°C). Внешний аккумулятор можно носить в кармане куртки, чтобы сохранить тепло и избежать проблем с производительностью. Значения силы сопротивления датчику и глубины записываются в виде бинарного кода в формате (*.pnt). Файлы могут быть легко скопированы на компьютер. Первичная обработка данных производится в прилагаемой к прибору программе.

Использование SMP для изучения снежных лавин

При помощи полученных данных могут быть решены две задачи, важные для понимания процесса формирования снежных лавин. Во-первых, это оценка пространственного распределения неустойчивых слоев снежной толщи на лавиноопасном склоне. Во вторых – возможность идентифицировать слои с точность до нескольких миллиметров, что позволяет получить более четкое представление о процессах, происходящих в снежной толще.

Ряд научных работ и статей были посвящены данной тематике в последующие годы, например такие ученые как C. Pielmeier (2003), K. Kronholm (2004), S. Bellaire (2010) and E. Lutz (2009) занимались исследованием пространственной и временной неоднородности снежного покрова. Также на основе данных полученных при помощи прибора было защищено несколько кандидатских диссертаций. На данный момент SnowMicroPen является единственным инструментом, позволяющий оперативно получить точные данные со значительной по площади территории.

Еще одной важной задачей стало выявление трещин и слабых слоев на основе полученных данных. Для этого было разработано несколько алгоритмов, точность результатов оказалась сопоставима с точностью данных, полученных при помощи механических тестов (Pielmeier and Marshall, 2009). Несмотря на эти достижения, микростратиграфия ослабленных слоев изучена достаточно плохо.

Использование SMP для изучения стратиграфии снежной толщи в высокогорных и полярных условиях.

Поскольку прибор технически достаточно сложен, позволяет делать измерения точностью от тысячных долей до 70 ньютон и в то же время должен выдерживать эксплуатацию в суровых условиях, его разработка длилась достаточно долго, было выявлено множество недочетов и неполадок. Тем не менее, инженерам удалось создать концепт, удобный в использовании, что было подтверждено в ходе исследований стратиграфии снежной и фирновой толщи. Так, SMP использовался в крайне суровых условиях во время экспедиций SnowSTAR2002 (Sturm et al., 2004), несколько сотен измерений были сделаны на станции Kohnen в Западной Антарктиде.

Кроме того, прибор был протестирован российскими учеными в рамках проекта по исследованию пространственно-временной неоднородности снежной толщи в Москве и в Хибинах. В ходе исследований было установлено, что прибор позволяет получить подробную информацию о строении снежной толщи, но возможности его эксплуатации в условиях метели ограничены в связи с намерзанием снега и изморози на щупе и его блокировкой. Такие наблюдения важно учитывать при дальнейшем совершенствовании прибора.

Использование SMP в радиолокационных исследованиях снежного покрова.

Радары и микроволновые радиометры используются для наблюдений за снежной толщей. Они чрезвычайно чувствительны, но обратный сигнал, приходящий на датчик от поверхности снега, в значительной степени рассеивается. Таким образом, часть информации теряется и ее сложно интерпретировать. Совмещение радиолокационных измерений с измерениями SMP может помочь преодолеть эту проблему (Marshall et al., 2007). Данное направление исследований актуально для масштабных исследований, например, спутниковой миссии CoReH2O, целью которого является измерение глобальных ресурсов пресной воды, содержащейся в снегу.

SMP как инструмент для измерения основных структурных свойств снега

В связи с актуальностью использования прибора в различных сферах хозяйственной деятельности разработчики и ученые в разных странах мира продолжают исследовать его возможности. На данный момент наиболее важным техническим вопросом является определение закономерностей взаимодействия наконечника зонда с кристаллами снега и механика разрыва связей между кристаллами под внешним воздействием.

Заключение

SnowMicroPen представляет собой высокоточный прибор, позволяющий получить подробные данные о стратиграфии снежного покрова, его динамике и процессах, происходящих внутри снежной толщи. Отсутствие аналогов и возможность применять прибор в суровых природных условиях делает его использование весьма актуальным в ряде исследований. Несмотря на все преимущества данного инструмента, имеют место различные недостатки, такие как массивность и неудобство транспортировки, проблемы с питанием при очень низких температурах, заклиниванием прибора во время метелей и в условиях, благоприятных для интенсивного формирования изморози на поверхности предметов. Разработчики не оставляют эти моменты без внимания и стараются найти подходящее решение для каждой из этих проблем. Наиболее актуальным направлением деятельности по совершенствованию SMP является исследование микропроцессов, происходящих в снежной толще при взаимодействии с наконечником датчика, а именно – сжатия снежной толщи и разрыва связей между кристаллами. Понимание физики взаимодействия поможет получить более точные данные и построить более совершенные модели, которые могут быть применимы в различных, в первую очередь, снеголавинных, исследованиях.

Работа выполнена в рамках НИР «Картографирование, моделирование и оценка риска опасных природных процессов (ГЗ)» №1.7, АААА-А16-116032810093-2 и гранта РНФ №16-17-00104 «Лавинный и селевой риск на территории России: оценка, прогноз и меры по его снижению»

Литература

Bader, H., R. Haefeli, E. Bucher, J. Neher, C. Eckel, and C. Thams (1939), Der Schnee und seine Metamorphose, Beitr. Geologie der Schweiz, Geotech. Ser. Hydrol., 3, 1–313.

Bellaire, S. 2010. Spatial variability of the snow cover and its effect on avalanche formation. Ph.D. thesis, University of Hamburg.

Dowd, T., and R. Brown (1986), A new instrument for determining strength in snow cover, Journal of Glaciology, 32(111), 299–301.

Kronholm, K. 2004. Spatial variability of snow mechanical properties with regard to avalanche formation. Ph.D. thesis, Department of Geography, University of Zurich. 187 pp.

Lutz, E.L. 2009. Spatial and temporal analysis of snowpack strength and stability and environmental determinants on an inclined, forest opening. Ph.D. Dissertation, Department of Earth Sciences, Montana State University. 364 pp.

Marshall, H., M. Schneebeli, and G. Koh (2007), Snow stratigraphy measurements with high-frequency FMCW radar: Comparison with snow micro-penetrometer, Cold Regions Science and Technology, 47(1-2), 108–117, doi:10.1016/j.coldregions.2006.08.008.

Pielmeier, C., 2003. Textural and mechanical variability of mountain snowpacks. PhD thesis, University of Berne, 127 pp.

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, doi:10.1016/j.coldregions.2009.06.005.

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, doi:10.1016/S0165-232X(99)00030-0.

Sturm, M., J. Johnson, and J. Holmgren (2004), Variations in the mechanical properties of arctic and subarctic snow at local (1-m) to regional (100-km) scales, in Proceedings of the International Symposium on Snow Monitoring and Avalanches (ISSMA-2004), Manali, India, pp. 233–238.

Комаров А.Ю., Гребенников П.Б., Селиверстов Ю.Г., Сократов С.А., Фролов Д.М. Изучение пространственно-временной неоднородности снежной толщи. Доклад на XVI Гляциологическом симпозиуме «Прошлое, настоящее и будущее криосферы Земли», Санкт-Петербург, Россия, 24-27 мая 2016

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