

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.578.46(215017)

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ СНЕЖНОЙ ТОЛЩИ “SNOWPACK”
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАВИНООБРАЗОВАНИЯ**

Е.Г. Мокров, А.Ю. Соловьев

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, географический ф-т,
119992, Москва, Ленинские горы, Россия, snowaval@yahoo.com*

Рассмотрена возможность определения параметров лавинообразования с помощью широко распространенной в мире одномерной математической модели развития снежной толщи “Snowpack” (Швейцарский Институт исследований снега и лавин, Давос). Модель “Snowpack” позволяет получать параметры снежной толщи для склонов различной высоты, крутизны и экспозиции, проводить пространственно-временную оценку устойчивости снега на склонах. Единственно доступным способом получения метеорологической информации, позволяющей оценивать основные факторы лавинообразования на склонах гор в малоисследованных районах, является использование модели “Snowpack”. Весной 2004 г. в Хибинах по договоренности со Швейцарским Институтом исследований снега и лавин была проведена верификация модели. В статье приведены результаты сравнительного анализа фактических данных лавинообразующих факторов и рассчитанных по модели “Snowpack”.

Лавины, устойчивость снега на склонах гор, лавинообразующие факторы, швейцарская модель “Snowpack”

**USE OF SNOW COVER EVOLUTION “SNOWPACK” MODEL
FOR DEFINITION OF AVALANCHING FACTORS**

E.G. Mokrov, A.Yu. Soloviev

*M.V.Lomonosov Moscow State University, Department of Geography,
119992, Moscow, Lininskie Gory, Russia, snowaval@yahoo.com*

The opportunity of definition of parameters of avalanche formation by means of one-dimensional mathematical model of snow cover evolution “Snowpack” (Swiss Federal Institute of Snow and Avalanches Research, Davos) widely used in the world is examined in the article. The “Snowpack” model allows one to obtain the parameters of snow cover for slopes of various height, steepness and exposition, and to carry out spatial-temporal estimation of snow cover stability on slopes. The meteorological information obtained by means of “Snowpack” model, allowing evaluation of the major factors of avalanching, is an unique opportunity to collect information in poorly investigated areas. In spring 2004 in the Khibini Mountains the verification of the model was accomplished according to the arrangement with the Swiss Federal Institute of Snow and Avalanches Research. Results of the comparative analysis between the factual data of avalanching parameters and the data calculated by means of the “Snowpack” model are presented.

Snow avalanches, snow stability on mountain slopes, avalanching factors, Swiss model “Snowpack”

ВВЕДЕНИЕ

В условиях расширения промышленных и рекреационных зон, развития экстремальных форм зимнего спорта задача исследования снежного покрова и прогнозирования нивальных стихийно-разрушительных явлений (лавин и водоснежных потоков) приобретает особое значение.

Изучение снежного покрова и процессов лавинообразования в Хибинах проводится с 1936 г. и

до настоящего времени (более 70 лет). Необходимость разработки новых методов прогноза лавинной опасности и оценки устойчивости снега на склонах в этом районе связана с возрастающими темпами развития горно-добывающей промышленности. Актуальность рекреационного освоения Хибинских гор обусловлена также притоком населения в зимнее время, в горнолыжный сезон.

УСЛОВИЯ ЛАВИНООБРАЗОВАНИЯ В ХИБИНАХ

Климат Кольского полуострова определяется его широтным положением, близостью незамерзающих акваторий Норвежского и Баренцева морей и одновременно водных пространств, большую часть года покрытых льдом, влиянием расположенного южнее материка. Большое влияние на климат Кольского полуострова оказывает близость зоны активного циклогенеза.

По характеру лавинообразования Хибинские горы относятся к полярному типу лавинного режима, который формируется в условиях субарктического климатического пояса – хибинский тип лавинного режима [Тушинский, 1949]. Основными факторами, способствующими образованию лавин, являются интенсивные снегопады и метели. Лавинный режим определяется частотой циклонических “атлантических” дней за зимний период (в среднем – с ноября по май). Длительность действия циклонов в среднем составляет 1,5–3,0 сут [Ижболдина, 1975].

В Хибинах наиболее распространенными и опасными являются пластовые лавины, или так называемые лавины из снежной доски. Продолжительная метелевая деятельность с выпадением снежных осадков способствует неоднородному распределению снега в зонах зарождения лавин, аккумулируя значительные массы снега на подветренных склонах за счет сноса с платообразных вершин. Превышение критической массы снега в лавиноборах приводит к потере устойчивости снежного пласта и, как следствие, образованию пластовых лавин. По данным наблюдений Центра лавинной безопасности ОАО “Апатит” (ЦЛБ), средняя толщина в местах отрыва лавин находится в пределах 0,6–0,7 м, а наибольшая составляет 4 м. Плотность снега, из которого состоят снежные доски, может меняться от 150 до 450 кг/м³. Измерения на линии отрыва показали, что прочность снега по контактной поверхности варьирует от 100 до 5000 Н/м². Площадь срывающегося пласта снега таких лавин составляет обычно 10²–10⁵ м².

Структурно-стратиграфическое строение снежного покрова зависит от метеорологических условий снегоотложения. В снежных разрезах преобладают горизонты мелко- и среднезернистого снега большой плотности (до 360–400 кг/м³). Для стратиграфии отложенного снега характерно наличие ветровых и ледяных корок, под которыми в результате термометаморфизма развивается глубинная изморозь. Высокая изменчивость погодных условий способствует появлению от 5–6 до 10–12 слоев различной микроструктуры в стратиграфических колонках снежной толщи. Усиленные процессы ветрового выдувания и миграции водяных паров приводят к образованию волокнистой текстуры снега. Температурный режим внутри

снежного покрова характеризуется небольшой величиной градиента между верхними и нижними горизонтами.

Сотни лавин сходят в Хибинах ежегодно в течение 7–8 зимних месяцев. По данным ЦЛБ, около 80 % естественных лавин сходит во время снегопадов, обычно сопровождаемых метелями, а 20 % приходится на период оттепелей и весеннего снеготаяния. За зимний период число дней с лавинами разного типа, по данным ЦЛБ, в среднем составляет 44 и колеблется от года к году в пределах 22–71. При этом среднее число дней с лавинами, вызванными снегопадами и метелями, приблизительно равно 35. Число дней с мокрыми лавинами составляет от 3 до 7 дней. Среднее количество лавин за зимний период на территории, контролируемой Центром лавинной безопасности ОАО “Апатит”, равно 107. Продолжительность лавиноопасного периода в Хибинах по среднемуголетним данным составляет 167 дней.

Комплексный анализ температурного режима и снежности зим за 70-летний период метеонаблюдений в Хибинах [Сапунов и др., 2006] показал наличие связи лавинной активности с типами зим, а также зависимость количества катастрофических (вызвавших жертвы и материальный ущерб) лавин от этих параметров. В многолетнем ряду число дней с лавинами несколько уменьшается с сокращением повторяемости холодных и аномально холодных зим. При сравнении климатических условий лавинообразования с параметрами лавин учитывалось то обстоятельство, что естественный режим лавинообразования в Хибинах нарушен высоким уровнем сейсмической активности территории антропогенного характера. Лавинные очаги Хибинского горного массива находятся в непосредственной близости от производства горных работ и регулярно подвергаются сейсмическим колебаниям и воздействию воздушных волн от мест производства технологических взрывов в карьерах ОАО “Апатит”. Расстояния от мест взрывов до контролируемых ЦЛБ зон зарождения лавин варьируют от сотен метров до нескольких километров.

Из общего количества лавин, зарегистрированных на территории, прилегающей к г. Кировску, и промплощадках ОАО “Апатит”, по среднеголетним значениям выделяются:

- 1) самопроизвольно сошедшие лавины – 60,11 %;
- 2) лавины, вызванные минометным обстрелом – 10,56 %;
- 3) лавины, вызванные сейсмическим воздействием от технологических взрывов – 22,04 %;
- 4) лавины, связанные с действиями людей в зонах лавинообразования – 0,55 %;
- 5) лавины, причины образования которых точно не определены – 6,74 % [Мокров, 2008].

На рис. 1 представлены кривые распределения количества самопроизвольных и антропогенных лавин по зимам. Под лавинами, сошедшими от внешних воздействий, подразумеваются лавины, которые сошли во время минометных обстрелов или в результате сейсмического воздействия от технологических взрывов.

Устойчивость снежного покрова на склонах гор характеризуется состоянием его механического равновесия. Снег может находиться в устойчивом состоянии и тогда, когда на некотором участке силы сдвига превышают предельное сопротивление сдвигу на подложке, при этом сдвигающие усилия компенсируются сопротивлением за счет контурных сил. Считается, что лавины образуются, когда напряжение сдвига превышает предельное сопротивление сдвигу в ослабленном слое или на опасном контакте. Метели и снегопады, а также сейсмическое воздействие приводят к изменению внешней нагрузки и, следовательно, изменению напряженно-деформированного состояния пласта снега.

Оценить устойчивость снежного покрова, в принципе, можно по результатам расчета распределения в нем механических напряжений и (или) деформаций, сопоставив их с каким-либо критерием прочности снега как материала [Берри, 1985].

Напряжения, в свою очередь, зависят от толщины снега, его плотности, коэффициента трения между слоями снега, слоем снега и подстилающей поверхностью и от величин, характеризующих механические свойства снежного покрова. Если эти параметры известны в каждой точке рассматриваемого участка склона, то можно рассчитать распределение напряжений в снежном покрове и выделить зоны, где эти напряжения превышают прочность снега. В таких зонах весьма вероятно зарождение лавин.

Пространственная изменчивость толщины и физико-механических характеристик снега в лавинных очагах в Хибинах очень велика и превышает их изменчивость во многих географических районах [Божинский, Черноус, 1986]. Пространственно-временная оценка устойчивости снега на склонах позволяет прогнозировать образование снежных лавин в конкретном лавинном очаге. Для оценки устойчивости необходимы данные о рельефе и параметрах снежной толщи в зоне зарождения лавин.

Параметры снежной толщи определяются непосредственным измерением величин при снегосъемках и шурфованиях снежного покрова, что является наиболее точным, но одновременно трудоемким и не всегда безопасным способом, осо-

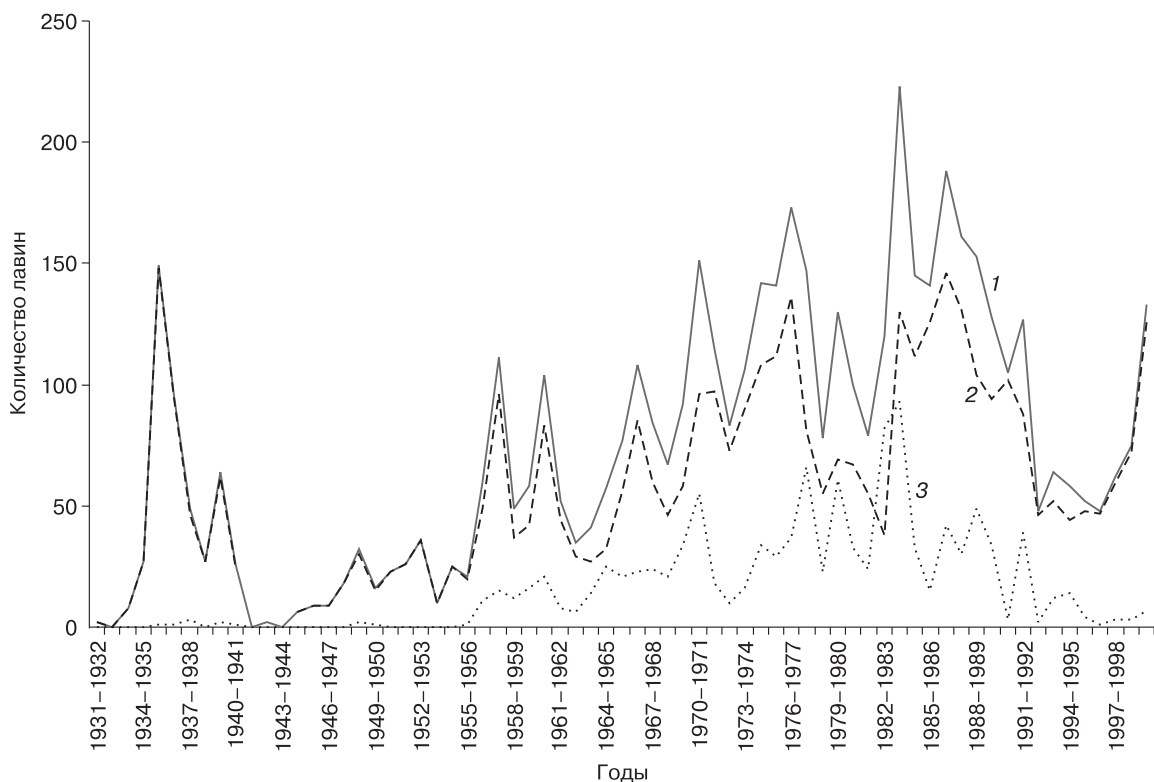


Рис. 1. Изменение количества снежных лавин за зимний период (01.11–31.05) с 1931 по 1998 г.:

1 — общее количество лавин; 2 — самопроизвольные лавины; 3 — лавины, сошедшие от внешнего воздействия.

бенно при шурфовании на склонах гор. Одним из доступных и перспективных подходов решения данной задачи является использование математических моделей развития снежной толщи, созданных для этих целей в виде программных продуктов [Brun et al., 1989; Durand et al., 1993].

Оценка устойчивости снега на склонах требует постоянного получения информации о факторах лавинообразования в местах зарождения лавин. И если оценка рельефа успешно осуществляется с помощью топографических карт, аэрофото- и космических снимков, то данные метеостанций не отражают условий лавинообразования в зоне формирования лавин и их изменчивость по территории. Для оценки устойчивости снега дистанционным методом, а также для прогнозирования схода лавин актуально применение моделей развития снежной толщи, в частности швейцарской модели "Snowpack".

Целью работы является изучение возможности использования швейцарской модели развития снежной толщи "Snowpack" для локального определения факторов лавинообразования на склонах гор. Для этого весной 2004 г. на горнолавиной станции "Центральная" Центра лавинной безопасности ОАО "Апатит" (плато Ловчорр, 1090 м над ур. моря) были проведены экспериментальные исследования по верификации модели "Snowpack".

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В районах со слабо развитой измерительной сетью для прогнозирования неустойчивых состояний снега и образования лавин предлагаются методики определения характеристик снега на склонах по данным стандартных метеорологических наблюдений с использованием модели развития снежной толщи и геоинформационных технологий [Соловьев, 2002]. В настоящее время наиболее распространенной является модель развития снежной толщи "Snowpack", которая с успехом применяется для различных целей в Швейцарии [Bartelt, Lehning, 2002; Lehning et al., 2002], Японии, Финляндии и других странах.

При наличии цифровой карты местности, метеонаблюдений, прогнозов погоды и данных о взрывах или ожидаемых естественных землетрясениях использование модели "Snowpack" позволяет получать параметры снежной толщи для склонов различной высоты, крутизны и экспозиции и проводить пространственно-временную оценку устойчивости снега на склонах.

Одномерная математическая модель развития снежной толщи "Snowpack" создана сотрудниками Швейцарского Института исследований снега и лавин. В виде программного продукта она реали-

зована на языке С. Первоначально модель предназначалась для применения противолавинными организациями Швейцарии при составлении прогноза лавинной опасности. Однако впоследствии диапазон ее использования был значительно расширен. В настоящее время модель "Snowpack" применяется также в мерзлотных исследованиях, для оценки взаимодействия снега и растительности, анализа изменений климата, для подсчета баланса массы и энергии в снеге в арктических районах, а также при расчете миграции химических растворов в снежном покрове.

В общем виде возникновение и развитие снежной толщи сводится к взаимодействию ряда физических факторов, обуславливающих процессы, происходящие как внутри снежной толщи, так и на контактах с окружающими средами.

Метеорологические данные, получаемые с определенной периодичностью с автоматических и (или) обычных метеостанций, расположенных рядом с местами зарождения лавин, используются в качестве входной информации.

Модель представляет собой систему дифференциальных уравнений для расчета переноса тепла, миграции газов и влаги, механической деформации в снежной толще. Свежий снег, ветровой перенос снега и его таяние представлены как особые граничные условия. Снег определяется как трехкомпонентный (лед, вода, воздух) пористый материал, способный к значительным необратимым вязким деформациям. Моделируются фазовые переходы между компонентами, из которых состоит снег. Для слоев снега рассчитываются не только толщина и плотность, но и микроструктура, т. е. размер, форма и размер контактов слагающих ледяную решетку зерен.

В соответствии с основной задачей, для которой создавалась модель – прогноз образования снежных лавин, в модель заложены следующие основные принципы.

1. Большинство лавин сходит во время или после интенсивных снегопадов, поэтому особое внимание уделяется разработке уравнений, описывающих начальные физические свойства (плотность, микроструктуру, температуру) нового и принесенного ветром снега.

2. Для определения скорости уплотнения (важного параметра механической стабильности снега) снег рассматривается как вязкоупругий материал, способный подвергаться большим нерегулярным деформациям.

3. Все фазовые переходы в модели могут быть определены с учетом сохранения массы и энергии.

4. Накопление и абляция снега учитываются как добавление и удаление конечных элементов в уравнениях.

Выходными данными модели "Snowpack" являются расчетные значения толщины снега, плотности и температуры по разрезу снежной толщи, напряжения нагрузки, особенности микроструктуры. В любой момент времени может быть визуализирован в виде графиков ход метеорологических элементов, поступающих с метеостанций, и результаты моделирования.

В настоящее время модель работает в режиме реального времени: данные, получаемые с метеорологических станций, сразу вводятся в модель, которая быстро выдает результаты расчетов. При наличии соответствующей информации о контролирующих факторах модели (входных данных) "Snowpack" может моделировать развитие снежной толщи на несколько часов, дней, недель, месяцев и даже лет.

С помощью модели получают информацию о стратиграфии снежной толщи. Горизонты отличаются как своими размерами, так и макро- и микросвойствами. Макроскопические свойства включают плотность, влажность и температуру слоев снега. Микроскопические свойства включают размер и форму ледяных зерен, размер их сцепления.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Верификация модели в России – моделирование снежного профиля и сравнение с полевыми наблюдениями – осуществлялась по договору со Швейцарским Институтом исследований снега и лавин в соответствии с разработанной программой исследований [Викулина и др., 2005]. Верификация физической модели в Хибинах выполнена для оценки связи между измеренными показателями

физико-механических свойств снега (толщины, плотности и прочности снега на сдвиг слоев снежной толщи), являющимися одними из основных параметров, входящих в модели устойчивости снега, и расчетными данными, полученными при помощи модели "Snowpack". Входными параметрами модели являлись: данные шурфования на плато Ловчорр от 05.04.2004 г. (табл. 1); данные метеорологических измерений, проводимых на горно-лавиной станции Центра лавинной безопасности ОАО "Апатит" на плато Ловчорр (1090 м над ур. моря).

Для статистического анализа использовались данные, полученные при непосредственных измерениях в шурфе на плато Ловчорр, от 09.04.2004, 18.04.2004, 29.04.2004 г.

На рис. 2 представлены стратиграфическая колонка, полученная на 29.04.2004 г. с помощью модели "Snowpack", и фактические данные шурфования, которое проводилось в тот же день на метеоплощадке горно-лавиной станции "Центральная" Центра лавинной безопасности (плато Ловчорр). При визуальном сравнении можно отметить их идентичность. Зависимости фактических значений параметров снежной толщи (толщины и плотности снега) в шурфах от рассчитанных по модели представлены на рис. 3, 4. Так как величина прочности снега на сдвиг с помощью модели не вычисляется, она находилась по обобщенным эмпирическим кривым Меллора [Mellor, 1975], построенным им для сухого связного снега при температуре от -3 до -10 °С, в зависимости от вычисленной плотности слоев снега. Зависимость фактических данных прочности снега на сдвиг в шурфах от вычисленных с помощью модели

Таблица 1. Параметры снежной толщи на плато Ловчорр (05.04.2004)

Номер слоя	Слои снега	Высота, см	Температура, °С	Плотность, кг/м ³	Средняя плотность, кг/м ³	Диаметр кристалла, мм	Сдвиг		
							Площадь, см ²	Усилие, кг	Предельное сопротивление сдвигу, Н/м ²
1	МЗ	17,0	-4,6	360	360	<1	100	4,5	4500
2	МЗ пл	11,0	-6,5	470	400	<1	100	4,0	4000
3	ЛК	0,2	-6,6	800	410	-	-	-	Не опр.
4	СКГИ	33,0	-6,4	370	390	2,5	100	5,0	5000
5	ЛК	3,0	-6,0	800	410	-	-	-	Не опр.
6	ККГИ	9,0	-5,8	370	400	4,0	100	0,9	900
7	ККГИ сып	4,0	-5,7	280	400	5,5	-	-	Не опр.
8	ЛК	3,0	-5,4	800	410	-	-	-	»
9	ККГИ смер	15,0	-4,9	380	410	4,0	-	-	»

Примечание. Высота шурфа 95,2 см. Структура снега по слоям: МЗ – мелкозернистый снег; МЗ пл – плотный мелкозернистый снег; СЗ – среднезернистый снег; ЛК – ледяная корка; СКГИ – средние кристаллы глубинной изморози; ККГИ – крупные кристаллы глубинной изморози; ККГИ сып – сыпучие крупные кристаллы глубинной изморози; ККГИ смер – смерзшиеся крупные кристаллы глубинной изморози.

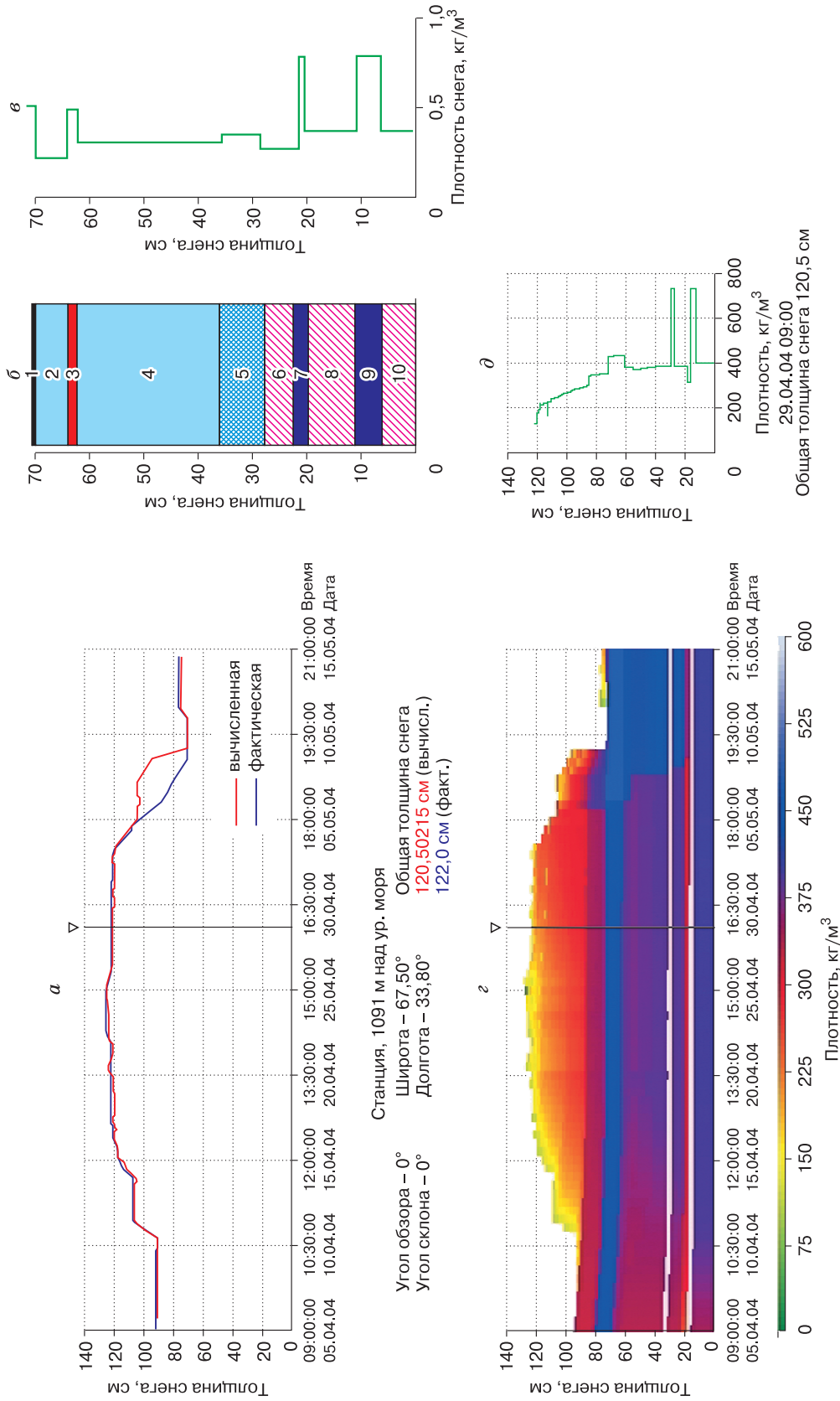


Рис. 2. Параметры снежной толщи на плато Ловчорр, измеренные в шурфе и вычисленные по модели “Snowpack” (29.04.2004):

a – фактическая и вычисленная с помощью модели “Snowpack” толщина снежного покрова на плато Ловчорр; *б* – стратиграфия снежного покрова, полученная в шурфе на плато Ловчорр (29.04.2004). Слои снега сверху вниз: 1 – ВК (ветровая корка); 2 – МЗ (мелкозернистый); 3 – ФК (фирновая корка); 4 – МЗ; 5 – СЗ (среднезернистый); 6 – ККТИ (крупные кристаллы глубоинной изморози); 7 – ЛК (ледяная корка); 8 – ККТИ; 9 – слой ЛК; 10 – ККТИ. *в* – плотность слоев снега, измеренная в шурфе на плато Ловчорр (29.04.2004); *г* – диаграмма распределения плотностей слоев снега, полученная с помощью модели “Snowpack”; *д* – колонка плотностей слоев снега, полученная с помощью модели “Snowpack” на 29.04.2004.

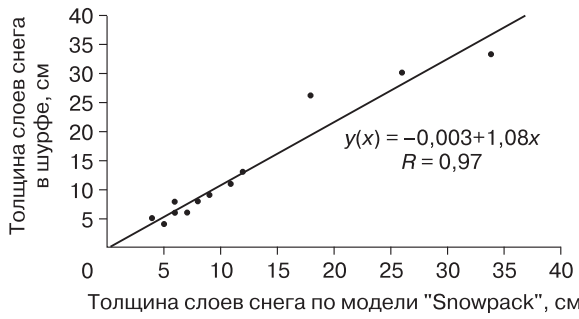


Рис. 3. Эмпирическая зависимость толщины слоев снега в шурфе (y) от толщины слоев снега по модели "Snowpack" (x).

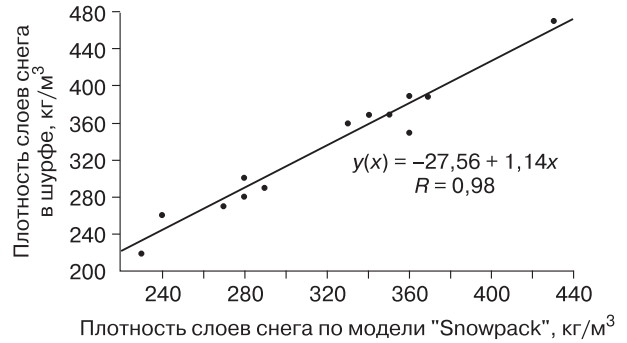


Рис. 4. Эмпирическая зависимость плотности слоев снега в шурфе (y) от плотности слоев снега по модели "Snowpack" (x).

"Snowpack" представлена на рис. 5. Фактические и расчетные значения параметров снежной толщи приведены в табл. 2.

Статистическая оценка зависимостей между измеренными в шурфах параметрами снежной толщи и показателями, полученными с помощью модели "Snowpack", показала их значимую (90%-ю) корреляционную связь (см. рис. 3–5). Коэффициенты корреляции (R) и стандартные ошибки (ст.ош.) уравнений регрессии составили: для толщины снега $R = 0,97$, ст.ош. – 2,4 см; для плотности снега $R = 0,98$, ст.ош. – 14 кг/м³; для прочности снега на сдвиг $R = 0,81$, ст.ош. – 976 Н/м². Невысокий коэффициент корреляции для прочности снега на сдвиг объясняется тем, что использованная эмпирическая зависимость этой величины от плотности снега является обобщенной. Для кон-

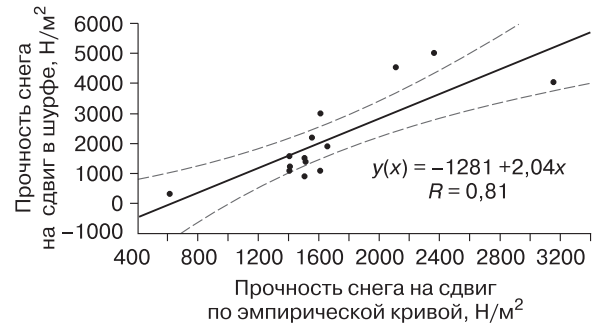


Рис. 5. Зависимость прочности снега на сдвиг в шурфе (y) от прочности снега на сдвиг, полученной по эмпирической кривой (x) [Mellor, 1975], вычисленной с помощью модели "Snowpack" по плотности снега.

Таблица 2. Значения параметров снежной толщи, измеренные в шурфе и вычисленные по модели "Snowpack"

Дата	Слой снега	Толщина слоев, см		Плотность слоев, кг/м ³		Прочность снега на сдвиг, Н/м ²	
		измер.	вычисл.	измер.	вычисл.	измер.	вычисл.
05.04.2004	МЗ	13	12	360	330	4500	2100
	МЗ пл	11	11	470	430	4000	3150
	СКГИ	33	34	370	350	5000	2350
	ККГИ	9	9	370	340	900	1500
09.04.2004	МЗ	5	4	390	360	1100	1400
	СЗ	8	8	260	240	1200	1400
	ККГИ	9	9	260	240	1600	1400
18.04.2004	МЗ	30	26	270	270	1500	1500
	СЗ	4	5	390	370	2200	1550
	СЗ	6	7	300	280	1400	1500
29.04.2004	МЗ	6	6	220	230	300	600
	МЗ	26	18	290	290	1900	1650
	СЗ	8	6	350	360	3000	1600
	ККГИ	6	6	280	280	1100	1600
		$R = 0,97$		$R = 0,98$		$R = 0,81$	

Примечание. R – коэффициент корреляции.

кретного района может быть найдена более точная статистическая зависимость между расчетными значениями плотности снега и фактическими значениями прочности снега на сдвиг. Улучшение качества определения прочности снега на сдвиг можно достичь путем совершенствования модели.

Объединение моделей развития снежной толщи с моделями оценки устойчивости снега на склоне, а в перспективе и с метеорологическими моделями позволит создать более совершенную интегрированную модель типа SAFRAN–CROCUS–MEPRA [Brun et al., 1989; Durand et al., 1993] для пространственно-временной оценки лавинного риска.

Использование модели развития снежной толщи “Snowpack” для вычисления параметров лавинообразования, входящих модели оценки устойчивости снега на склоне, позволяет проводить оперативную пространственно-временную оценку устойчивости снега на склонах различной крутизны, экспозиции и высоты, что открывает большие возможности в исследованиях лавин.

Авторы выражают благодарность сотрудникам горно-лавиной станции “Центральная” Центра лавинной безопасности ОАО “Апатит” и Хибинской учебно-научной базы МГУ за оказанную помощь в проведении экспериментов по теме настоящей статьи, за помощь в обработке данных и апробации модели развития снежной толщи “Snowpack” сотруднику НИЛ снежных лавин и селей МГУ Ю.Г. Селиверстову. За конструктивную критику и консультации авторы признательны д-ру геогр. наук Е.С. Трошкиной. За предоставленную возможность использовать компьютерную программу “Snowpack” авторы благодарят сотрудника Швейцарского Института исследований снега и лавин М. Ленинга (M. Lehning).

Литература

- Берри Б.Л.** Хрупкое разрушение снега и вопросы оперативного прогноза лавин из снежных плит // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 1985, № 3, с. 74–80.
- Божинский А.Н., Черноус П.А.** Вероятностная модель устойчивости снега на склонах гор // Материалы гляциол. исслед., 1986, вып. 55, с. 53–60.
- Викулина М.А., Мокров Е.Г., Подольский Е.А. и др.** Некоторые результаты оценки качества определения лавинного риска // Материалы гляциол. исслед., 2005, вып. 99, с. 105–107.
- Ижболдина В.А.** Аэросиноптические условия образования и схода метелевых лавин на Кольском полуострове // Исследования снега и лавин в Хибинах. Л., Гидрометеоздат, 1975, с. 51–63.
- Мокров Е.Г.** Сейсмические факторы лавинообразования. М., Науч. мир, 2008, 132 с.
- Сапунов В.Н., Селиверстов Ю.Г., Трошкина Е.С., Черноус П.А.** Температурный режим в зимние сезоны и его влияние на лавинную активность в Хибинах // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 4, с. 68–73.
- Соловьев А.Ю.** Геоинформационные методы исследования лавинной опасности на примере Хибинского горного массива: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2002, 21 с.
- Тушинский Г.К.** Лавины. Возникновение и защита от них. М., Географгиз, 1949, 213 с.
- Bartelt P., Lehning M.** A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning. Pt I. Numerical model // Cold Reg. Sci. Technol., 2002, vol. 35, p. 123–145.
- Brun E., Martin E., Simon V. et al.** An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting // J. Glaciol., 1989, vol. 35, No. 121, p. 333–342.
- Durand Y., Brun E., Mérindol L. et al.** A meteorological estimation of relevant parameters for snow models // Ann. Glaciol., 1993, No. 18, p. 65–71.
- Lehning M., Bartelt P.B., Brown R.L. et al.** A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning. Pt II. Snow microstructure // Cold Reg. Sci. Technol., 2002, vol. 35, p. 147–167.
- Mellor M.** A review of basic snow mechanics // Proc. of the Intern. Symp. on Snow Mechanics. Grindelwald, Swiss, Intern. Assoc. Hydrol. Sci. Publ., 1975, vol. 114, p. 251–291.

Поступила в редакцию
14 мая 2009 г.