

УДК 629.113, УДК 551.578.46

В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков

**ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВЛИЯНИЮ МЕСТНОСТИ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА**

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева

В статье проведен обзор и анализ работ, рассматривающих особенности формирования снега, а также районирования различных территорий по характеру снежного покрова. Рассматриваются подходы к моделированию изменения высоты и плотности снежного покрова и других параметров. Приведены результаты исследований влияния характеристик местности на процессы формирования снежного покрова. Представленный в статье анализ и значения позволяют прогнозировать основные характеристики снежного покрова, необходимые для оценки подвижности и проходимости транспортно-технологических средств на местности.

Ключевые слова: снег, статистические характеристики, высота и плотность, подвижность

Решение вопросов подвижности в условиях заснеженной местности с научной и технической точек зрения лежит в области исследования взаимодействия движителя с поверхностью движения. Поэтому важным является знание о распределении снежного покрова. Работы, посвященные исследованию снежного покрова, в том числе как полотна пути для транспортных средств, ведутся с конца XIX века. Одними из первых работ по исследованию свойств снега являются труды А.И. Воейкова [1], П.П. Кузьмина [2] и Г.Д. Рихтера [3]. В них рассмотрены особенности формирования снега, а также районирование территории стран бывшего СССР по характеру снежного покрова. В основу районирования положены два показателя: максимальная высота снежного покрова и продолжительность многоснежного периода. За максимальную высоту принята наибольшая среднедекадная высота снежного покрова, взятая из выборки многолетних средних величин по каждой из метеостанций. Также в этих работах приводятся различные классификации снега, причем превалирует качественное описание видов снега, в основном по внешним признакам (структуре) и плотности.

Исследованием снежного покрова с точки зрения возможности передвижения по нему транспортных средств занимались ученые и исследователи «Нижегородской школы транспортного снеговедения»: Веселовский М.В., Рукавишников С.В., Николаев А.Ф., Куляшов А.П., Барахтанов Л.В., Беляков В.В., Шапкин В.А. и их ученики [4-6].

Необходимо отметить, что во многих литературных источниках имеется некоторая несогласованность в определениях. Так, в одной части работ говорится о «высоте», а в другой о «глубине» снега. Данная неточность имеется и в некоторых иностранных работах. С точки зрения авторов, более уместно говорить о высоте «ненарушенного» снежного покрова, а в случае его деформации – о глубине образуемой колеи.

Так как снежный покров распространен по поверхности неравномерно, рассмотрим, как влияют параметры местности на его высоту и плотность, которые являются основными характеристиками, определяющими проходимость и подвижность транспортных средств. Остальные характеристики, необходимые для оценки движения, могут быть определены из этих двух параметров [7, 8].

Рассмотрим некоторые из работ по исследованию снежного покрова. Исследованию водного эквивалента (SWE), плотности и высоты снега в швейцарских Альпах посвящена одна из многих работ [9] Швейцарского федерального института леса, снега и ландшафтных исследований (WSL). Дана статистика распределения этих параметров по совокупности измеренных точек (в разных областях местности). В работе произведен анализ указанных ранее параметров и их взаимосвязь между собой.

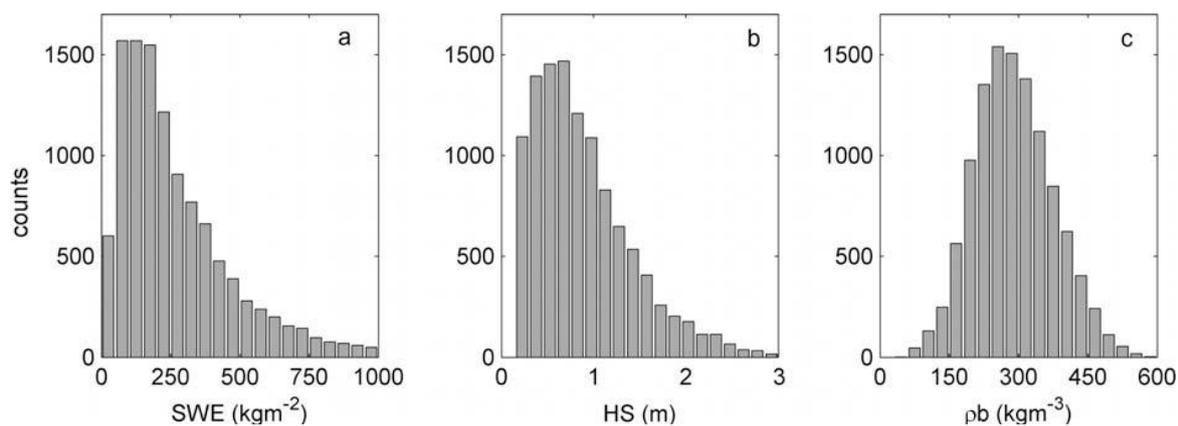


Рис. 1. Распределения водного эквивалента SWE, высоты и плотности снега по территории швейцарских Альп за пять десятилетий [9]

Моделирование параметров снежного покрова в работе [10] основано на анализе микроволнового излучения на частотах 10 ГГц, 18 ГГц и 36 ГГц, в результате чего могут быть получены характеристики снежного покрова на основании микроволнового дистанционного зондирования. Работа проведена на примере характеристик снега в Синьцзяне (Китай).

В статье [11] рассматривается пространственная и временная изменчивость сезонной плотности снега. Исследование опирается на значительный набор данных о плотности снега и климатические наблюдения в США, Австралии и странах бывшего Советского Союза с использованием методов регрессии.

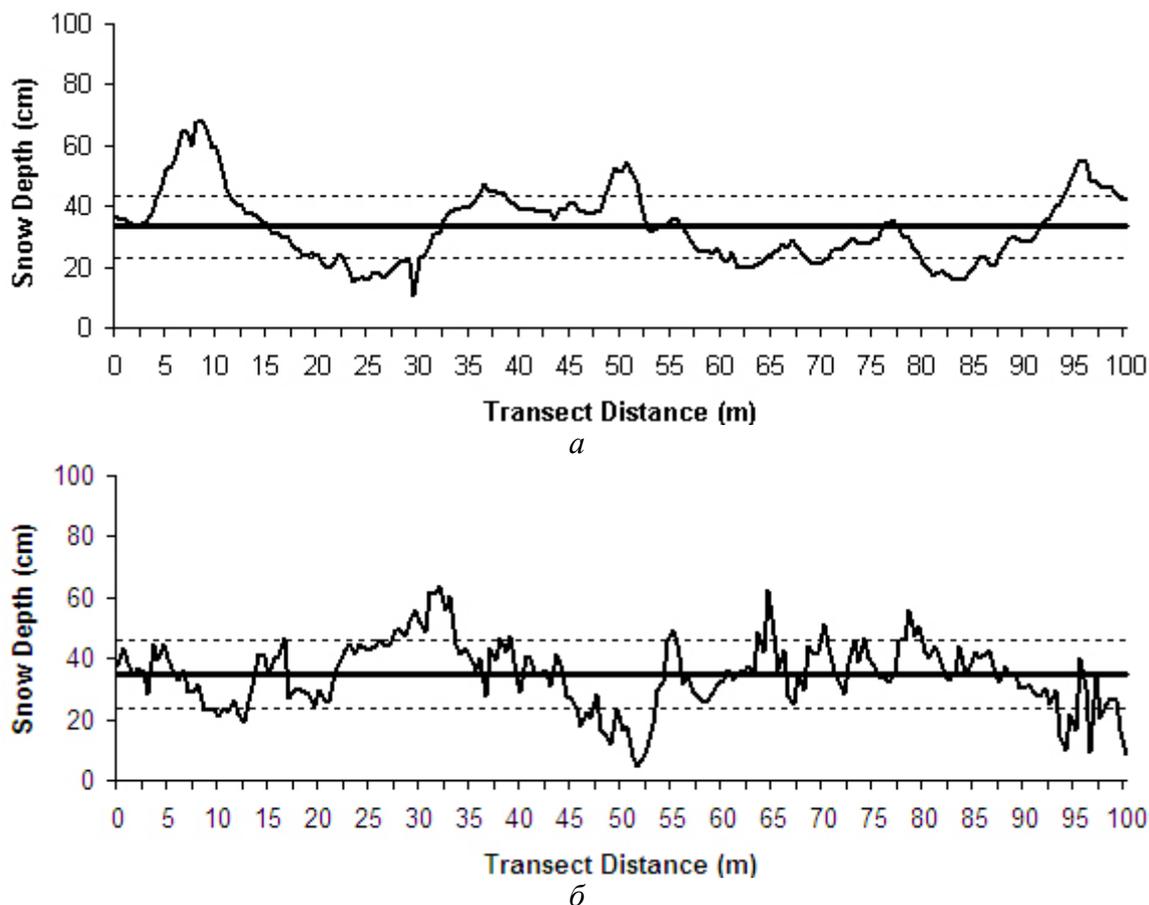


Рис. 2. Типичные профили высоты снега на озере (а) и участках тундры (б). Среднее значение показано жирной черной линией; пунктирные линии указывают ± 1 стандартное отклонение [16]

Многие работы посвящены исследованию снежного покрова, а также изменению его основных характеристик (высоты, плотности и водного эквивалента), например [12-14]. В работах приводятся модели снежного покрова, позволяющие прогнозировать изменение его характеристик по конечному числу известных данных. Приводятся разные математические модели, отличающиеся разной достоверностью. Модели работы [12] основаны на многолетних наблюдениях. Работа [15] посвящена моделированию характеристик снежного покрова по имеющимся дискретным значениям и больше относится к метеорологии и гляциологии. Зная водный эквивалент снега, доступный со спутников дистанционного зондирования, можно получить не только высоту, но и температуру. В работе [16] исследуется распределение высоты, плотности и структуры снега по мерным участкам. Примеры результатов экспериментальных исследований представлены на рис. 2-4.

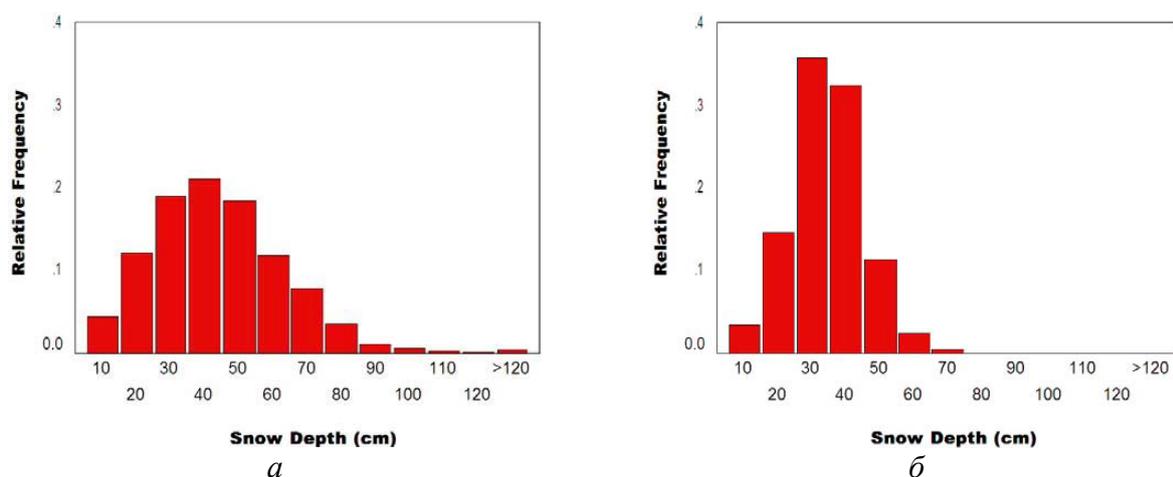


Рис. 3. Изменения высоты снежного покрова:

a - наземные участки; *б* - озеро / река [16]

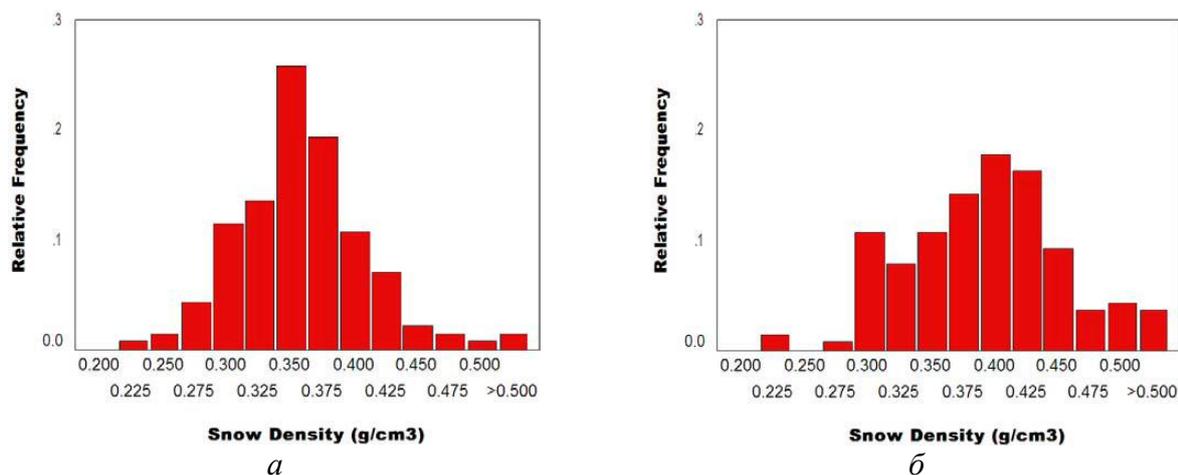


Рис. 4. Изменения плотности:

a - наземные участки; *б* - озеро / река [16]

Также исследованию распределения характеристик снежного покрова посвящена работа [17]. В ней проанализировано местность вокруг озера (Lake Superior) в зимний период с 1979 по 2003 годы. В исследовании [18] разработан метод распределения снега (определяются глубина, плотность и водный эквивалент) в зависимости от ландшафта местности. Учитываются такие параметры как угол наклона направления склона (азимут), тип леса (открытая местность, редкий лес, лиственный, смешанный и хвойный леса). Предложены оригинальные модели типа «сплюснутого конуса» распределения высоты и плотности снега. Отметим, что в работе говорится о влиянии солнечной активности, альbedo поверхности, теп-

лопередачи, испарении и конденсации воды в снеге и прочих факторах. Все это влияет на процессы снегообразования. В результате приводятся уравнения, полученные по результатам снегомерных съемок, которые описываются аналитическими аппроксимационными зависимостями с двумя эмпирическими коэффициентами.

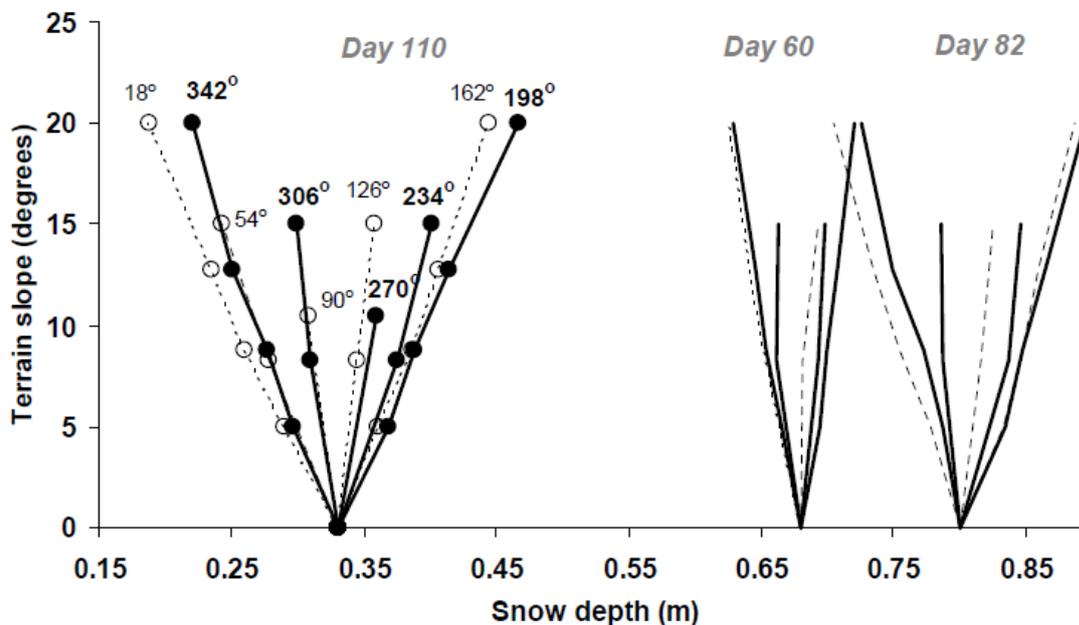


Рис. 5. Экспериментальные данные об изменении высоты снежного покрова (ось абсцисс) в зависимости от угла склона (ось ординат). Кружками показаны замеры. Толстыми линиями описываются восточные склоны по соответствующим азимутам (198°, 234°, 270°, 306°, 342°), пунктирными западные (18°, 54°, 90°, 126°, 162°). Склон по азимуту 18° - является наиболее южным, 198° - наиболее северным. Данные приведены для 60, 82 и 110 дней замеров [18]

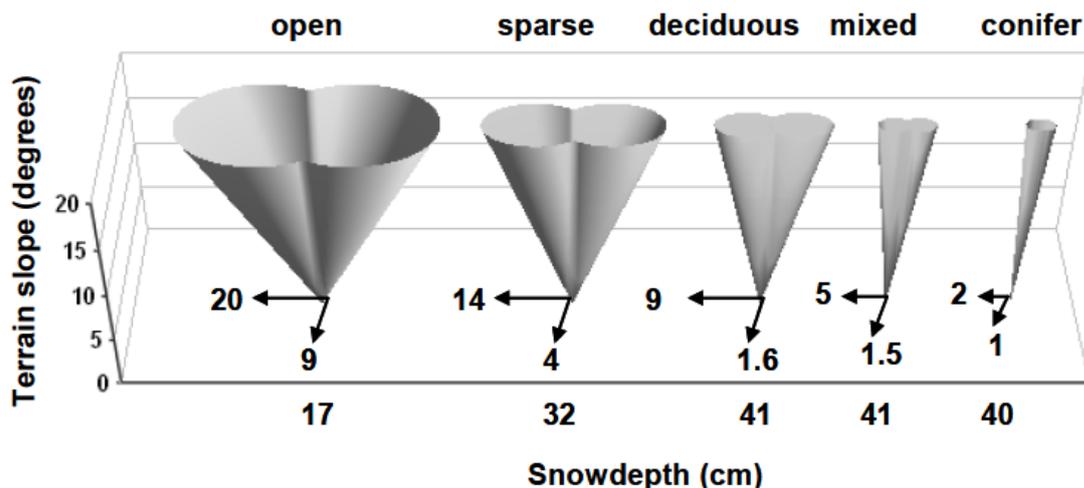


Рис. 6 Глубина снега на 900-метровой высоте над уровнем моря на 110 день измерений. Значения приведены для разных типов лесов: открытая местность, редкий лес, лиственный, смешанный и хвойный леса [18]

Аналогичным исследованиям посвящена работа [19]. Также строятся «плюснутые конуса», учитывающие ландшафт местности. Однако основная направленность на прогнозирование подвижности (определение средней скорости движения по пересеченной местно-

сти). Отметим, что исследование проведено для наземных транспортных средств, которые используются армией США и в перспективе необходимы для поддержки проведения специальных операций на заснеженной местности. Основная идея основана на том, чтобы по имеющимся данным о склонах местности, азимутах, и высотах, а также характеру растительности (открытая местность, редкие деревья, лиственные, смешанные и хвойные леса) представить распределение высоты и плотности снежного покрова.

В продолжение данной тематики рассмотрим работу [20]. С использованием представленных моделей снежного покрова проведена имитация движения с целью обучения вождению персонала армии США и дальнейшей модификации транспортных средств под заданные условия движения. В дополнение к снегу учтены характеристики типов почв и их распределение. Исследование проводилось для трех машин: CIV (CRREL Instrumented Vehicle), HMMWV (High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle) и Stryker. Таким образом, изменение параметров высоты и плотности снега связано с характером ландшафта местности, растительностью, ветром, солнечной активностью и прочими факторами. В работе [21] приводятся следующие данные о влиянии ландшафта на глубину залегания снежного покрова, показанные в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты, учитывающие влияние ландшафта на глубину снега [21]

Тип ландшафта	Коэффициент
Целина	1
Открытая ледяная поверхность озер	0,4-0,5
Пашня	0,9
Холмистые районы	1,2
Крупные лесные массивы	1,3-1,4
Речные русла	3
Заросли камыша на озерах	3
Лесные колки шириной 100-200 м и лесные опушки	3,2-3,4

В работе [2] приводятся следующие данные. Плотность сухого снежного покрова под пологом леса, по данным синхронных измерений, как правило, ниже, чем на открытых участках, что объясняется ослаблением в лесу таких факторов уплотнения снега, как зимние оттепели и ветер. Зависимость плотности снега в лесу от плотности на открытых участках выразилась прямой линией, уравнение которой имеет вид: $\rho_{лес} = 0,87\rho_{поле}$ [2].

Влияние характеристик леса может быть разным. Например, в соответствии с данными [22] влияние средняя глубина снега в кедровых и еловых лесах меньше чем пихтовых и на гари порядка 0,76 раз, а плотность в еловых лесах меньше чем во всех остальных в 0,9 раз. Все это связано с многообразием факторов, таких как [22]:

- абсолютная высота местности, удаленность от водоразделов и их ориентация по отношению к господствующим зимним ветрам;
- микро- и мезорельеф горного склона;
- ориентация и угол наклона земной поверхности;
- характер растительного покрова;
- видовой состав, возраст и полнота хвойных лесонасаждений;
- ветровой режим;
- интенсивность прямой и суммарной солнечной радиации;
- сумма и распределение по сезону твердых осадков; преобладание осенней или весенней циклонической деятельности;

- температура и влажность воздуха, суточный и сезонный ход этих показателей;
- температура снежной поверхности и толщи снега, их суточный и сезонный ход.

Взаимодействие и взаимовлияние этих факторов снегонакопления порождает зимние геосистемы со сложной структурой, обладающей пространственно-временной изменчивостью.

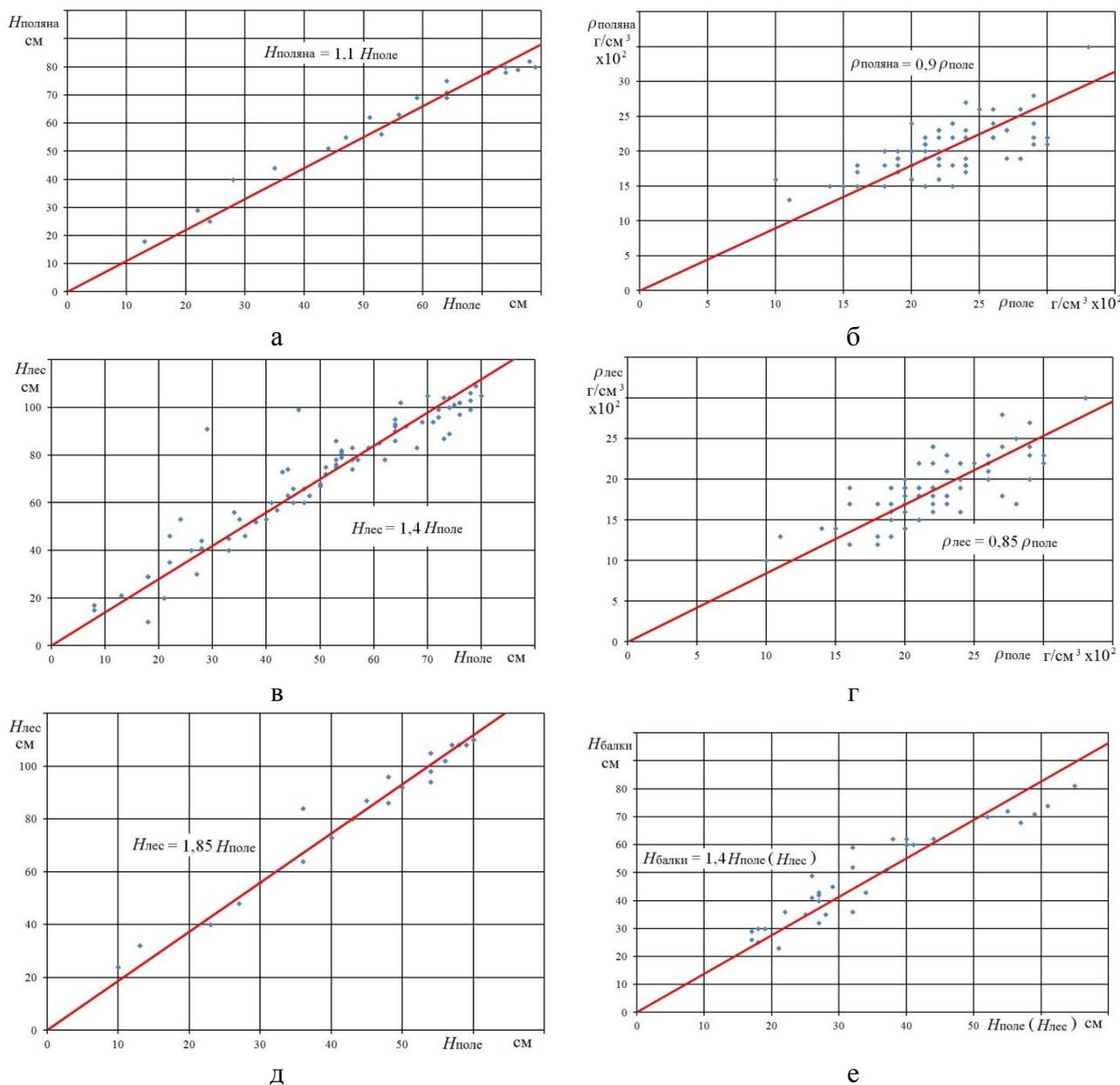


Рис. 7. Соотношение параметров снега:

а - высоты на поляне в лесу и поле; *б* – плотности на поляне в лесу и поле; *в* – высоты под кронами деревьев в лесу и поле; *г* – плотности под кронами деревьев в лесу и поле; *д* - высоты под кронами деревьев в лесу и поле; *е* - высоты в ямах и балках и в поле или лесу.

Точками показаны экспериментальные значения

Наряду с микрорельефом на снегонакопление на склонах оказывают влияние зимние оттепели и направление господствующего ветра. По наблюдениям за ряд лет (1923–1941) в районе центральной лесостепной зоны европейской части страны (Козменко и Ивановский, 1952), коэффициенты снежности склонов при господствующих метелевых ветрах с юго-востока, востока и юга выражаются следующими данными, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

Влияние ветра на снежность склонов [2]

Ровный водораздел	1,0
Склон, экспонированный на Юго-Восток, Восток и Юг	0,5
Склон, экспонированный на Северо-Восток	1,0
Склон, экспонированный на Юго-Запад	1,2
Склон, экспонированный на Север и Запад	1,5
Склон, экспонированный на Северо-Запад	2,0

Весьма значительная разница в коэффициентах снежности на юго-восточных (0,5) и северо-западных (2,0) склонах объясняется тем, что при указанном направлении преобладающего ветра юго-восточные склоны оказываются наветренными. Снег на этих склонах сдувается во время метелей и подтаивает во время зимних оттепелей, т.е. количество его в обоих случаях уменьшается, в то время как на подветренных северо-западных склонах происходит увеличение общей массы снегозапасов благодаря отложению переносимого ветром снега во время метелей. В целом для распределения снежного покрова в открытой местности имеет значение не только геометрия различного рода макро- и микронеровностей подстилающей поверхности, но и их взаимное расположение на местности [2].

На основании исследований, проведенных авторами работы, а также [2, 22, 23] можно выделить некоторые характерные участки, на которых формирование снега происходит с учетом предложенных зависимостей и поправочных усредненных коэффициентов. Значения были получены для средней полосы России с ярко выраженными временами года, хотя в каждом конкретном случае может потребоваться уточнение. Данные коэффициенты во многом зависят от ветров, присущих рассматриваемой территории, а также близости к водоемам (например, морям или рекам). Также на различных территориях из-за постоянных ветров разница глубин снега на полях и в лесах может отличаться в два-три раза.

Полученные коэффициенты и их средние квадратичные отклонения сведены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты, учитывающие влияние ландшафта на глубину и плотность снега

Сравниваемые участки	$K_{Н}^{местн}$	СКО*	$K_{Р}^{местн}$	СКО
поле/ поле	1	-	1	-
поляна в лесу/ поле	1,1	0,125	0,9	0,15
лес/ поле	1,4 (1,85)**	0,3 (0,2)**	0,85	0,13
Ямы (балки)/поле (лес)***	1,4	0,2	-	-

Примечания.

* Среднее квадратичное отклонение.

** Значение в скобках получено также для леса, но очевидно имелись другие весомые факторы (данные о ветрах) повлиявшие на результат.

*** Если ямы и балки в поле, то относительно поля. Если ямы и балки в лесу, то относительно леса. Плотность аналогична полю или лесу.

Приведенный в статье анализ и значения позволяют прогнозировать основные характеристики снежного покрова, необходимые для оценки подвижности [24, 25] и проходимости транспортно-технологических средств на местности.

Исследование проведено при поддержке «Грантов Президента РФ» № 14.124.13.1869-МК.

Библиографический список

1. **Воейков, А. И.** Снежный покров, его влияние на почву, климат и погоду и способы исследования // Записки Русского географич. об-ва, 1889. Т. XVIII.
2. **Кузьмин, П.П.** Формирование снежного покрова и методы определения снегозапасов / П.П. Кузьмин. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 169 с.
3. **Рихтер, Г.Д.** Снежный покров, его формирование и свойства / Г.Д. Рихтер. – М.: Изд-во АН СССР, 1945. – 120 с.
4. Снегоходные машины / Л.В. Барахтанов [и др.]. – Горький: Волго-Вятское кн. Изд-во, 1986. – 191 с.
5. Отраслевая научно-исследовательская лаборатория вездеходных (снегоходных) машин. К 50-летию со дня основания (1962 -2012 гг.) / А.А. Аникин [и др.]; НГТУ им Р.Е. Алексеева. – Н.Новгород, 2012. – 272 с.
6. Вездеходные транспортно-технологические машины. Основы теории движения: монография / под. общ. ред. В.В. Белякова и А.П. Куляшова. – Н. Новгород: ТАЛИАМ, 2004. – 961 с.
7. **Беляков, В.В.** Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных средств. дис. ... докт. ех. наук: 05.05.03. Нижний Новгород 1999. – 485 с.
8. **Беляков, В.В.** К вопросу выбора экспериментальных данных для составления статистических моделей снежного покрова как полотна пути для транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.]// Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. №1 С. 136-141.
9. Jonas, T., Marty, C., Magnusson, J., 2009. Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Swiss Alps. *J. Hydrol.* 378 (1–2), 161–167.
10. Dai, L. Y., Che, T., Wang, J., and Zhang, P.: Snow depth and snow water equivalent estimation from AMSR-E data based on a priori snow characteristics in Xinjiang, China, *Remote. Sens. Environ.*, 127, 14–29, 2012.
11. Bormann, J. Kathryn, Westra, Seth, Evans, P. Jason (2013) Spatial and temporal variability in seasonal snow density, 63-73.
12. Dutra, E., 2011: Global Land-Atmosphere Coupling Associated With Cold Climate Processes. Ph.D. Thesis, University of Lisbon, Portugal, 103 pp.
13. Dutra, Emanuel, Gianpaolo Balsamo, Pedro Viterbo, Pedro M. A. Miranda, Anton Beljaars, Christoph Schär, Kelly Elder, 2010: An Improved Snow Scheme for the ECMWF Land Surface Model: Description and Offline Validation. *J. Hydrometeor.* 11, 899–916.
14. Niu, G.-Y., and Z.-L. Yang, 2007: An observation-based formulation of snow cover fraction and its evaluation over large North American river basins, *J. Geophys. Res.*, 112, D21101
15. Sun, C., Walker, J. P. and Houser, P. R., 2004. A Methodology for Snow Data Assimilation in a Land Surface Model. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 109, D08108
16. Sturm, Matthew ; Derksen, Chris ; Liston, Glen ; Silis, Arvids ; Solie, Daniel ; Holmgren, Jon ; Huntington, Henry. A reconnaissance snow survey across Northwest Territories and Nunavut, Canada, April 2007. Hanover, N. H. : [US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center], Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 2008.
17. Steven F. Daly, Timothy B. Baldwin, and Patricia Weyrick / Analysis of the Lake Superior Watershed Seasonal Snow Cover. Cold Regions Research and Engineering Laboratory U.S. Army Engineer Research and Development Center, Hanover, 2007
18. Melloh, R.A., Shoop, S., Coutermarsh, B., 2007. Shaped solution domains for snow properties. 63rd Eastern Snow Conference, Newark, Delaware USA 2006, pp. 231–243.
19. Melloh R, Richmond P, Shoop S, Affleck R, Coutermarsh B. Continuous mapping of distributed snow depth for mobility models using shaped solutions. In: Cold Regions Science and Technology, International Polar Year 2007. Special issue; 2007.
20. R.T. Affleck, R.A. Melloh, S.A. Shoop. Cross-country mobility on various snow conditions for validation of a virtual terrain - *Journal of Terramechanics*, 2009, no. 46, pp. 203–210.
21. Снег: справочник: [пер. с англ. под ред. В.М. Котлякова] / под ред. Д. М. Грея, Д. Х. Мэйла. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 751 с.
22. **Малюгин, Ю. Ф.** Факторы формирования снежного покрова в районах со сложной орографией (на примере Южного Сихотэ-Алиня): дисс. ... канд. географических наук : 11.00.07. - Москва, 1985. – 168 с.

23. Официальный сайт ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных» (ВНИИГМИ-МЦД). URL: <http://www.meteo.ru/>
24. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. №3. С. 145–174.
25. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. №4. С. 72-77.

*Дата поступления
в редакцию 06.07.2014*

V.S. Makarov, D.V. Zezyulin, V.V. Belyakov

REVIEW OF THE RESEARCHES ON TERRAIN INFLUENCE ON SNOW COVER CHARACTERISTICS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Subject/topic/purpose: Overview of studies of the influence of terrain parameters on processes of formation of snow cover.

Methodology of work: Statistical treatment of experimental data.

Results/application: The review and analysis of studies considering peculiarities of snow and zoning of different areas by the nature of snow cover has been conducted. Approaches to modeling of the change of height and density of the snow cover and other parameters have been considered. The results of studies of the influence of terrain characteristics on processes of snow cover formation have been shown.

Findings: Analysis and the values given in the article allow to predict the main characteristics of snow cover needed to assess the mobility and trafficability of the transport and technological vehicles .

Key words: snow, statistical characteristics, heig.