

# ДИНАМИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА\*

К. Г. РУВИНШТЕЙН, С. С. ГРОМОВ, М. В. ЗОЛОВА

*Гидрометцентр России, Москва*

e-mail: k\_rubin@mecon.ru, 4sg@mail.ru, mzoloeva@yandex.ru

In this paper a method of the derivation of the dynamic classification scheme of the snow cover is described. Results of the first experiments on the albedo modification dependent on snow classes are presented. The fundamental purpose of the study is an improvement of the snow characteristics description in the hydrodynamic models owing to the accounting for the vertical structure and variation of the physical properties of snow.

## Введение

При моделировании изменения климата одним из наиболее тонких и сложных моментов является воспроизведение обратных связей климатической системы с максимальной близостью природе. Сезонный снежный покров наряду с облачностью — это сильнейший показатель обратной связи в климатической системе. Снежный покров при своем появлении радикально меняет энергетику атмосферы, с другой стороны, эти изменения отражаются на свойствах снежного покрова.

Основной задачей данной работы является развитие физического описания снежного покрова в гидродинамических моделях за счет учета его вертикальной структуры и изменения физических свойств снега в соответствии с ней. Для учета вертикальной структуры (стратиграфии) снега разработана и внедрена в гидродинамическую модель процедура так называемого “динамического” метода классификации снежного покрова. Метод основан на идеях классификации типов снежного покрова, он предложен для климатического снежного покрова (и в дальнейшем называется “климатический”) в работах Штурма [1]. В этом методе при определении класса снега используется анализ изменения трех метеорологических параметров (приземной температуры воздуха, осадков и ветра) за предшествующий формированию снега интервал времени. Данный метод выгодно отличается от многочисленных более ранних методов классификации снежного покрова тем, что тип снега определяется по истории изменения метеорологических параметров, а не по свойствам самого снега. Другим достоинством предложенного метода является выделение относительно небольшого числа классов, которые описывают реальные типы снежного покрова.

---

\*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке INTAS (грант № 03-51-5296), Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 04-05-64151, № 05-05-08018), ОФИ (грант № 06-05-64104), NATO ESP CLG (грант № 981842).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2006.

В настоящей работе кратко описывается алгоритм динамической классификации и приводятся первые результаты по его испытанию в рамках модели общей циркуляции атмосферы Гидрометцентра России.

## 1. Динамическая классификация снежного покрова

Как уже упоминалось, в работе [1] предложена классификация снежного покрова, полученная по климатическим величинам температуры приземного воздуха, осадков и ветра, которая характеризует сформировавшийся снежный покров в середине — конце зимы. Выделено шесть классов снега: “тундра”, “тайга”, “горный”, “степной”, “морской” и “эфемерный”. Названия классов взяты в кавычки, так как они определяют только свойства снега и не привязаны напрямую к климатогеографическим зонам. Типичная стратиграфия для каждого класса снега показана на рис. 1. В системе классификации учтены такие характеристики, как период залегания, условия формирования и глубина снежного покрова, наличие ледяных вкраплений и слоев, а также другие свойства. Можно видеть, что вертикальная структура классов значительно различается. В связи с этим различаются и отражательная способность снежной поверхности, теплопроводность и теплоемкость снега. Последние свойства снега наиболее важны при взаимодействии с атмосферой и почвой.

В работе [1] построено глобальное распределение классов, которое используется в оперативной практике оценки свойств снежного покрова при расшифровке спутниковой информации NOAA (США). М. Штурмом предложен формальный алгоритм определения класса снежного покрова. Средние годовые метеорологические величины (приземная температура воздуха, интенсивность осадков и скорость ветра) сравниваются с соответствующими критическими величинами. Блок-схема этого алгоритма приведена на рис. 2. Классификация снега проводится для годового интервала по месячным средним многолетним величинам [2]. В ряде регионов мира М. Штурм сверял свою классификацию с реальной стратиграфией и таким образом подбирал критические величины.

Основной задачей при разработке динамического метода, с помощью которого предполагается рассчитывать тип снега для произвольного текущего момента времени, является

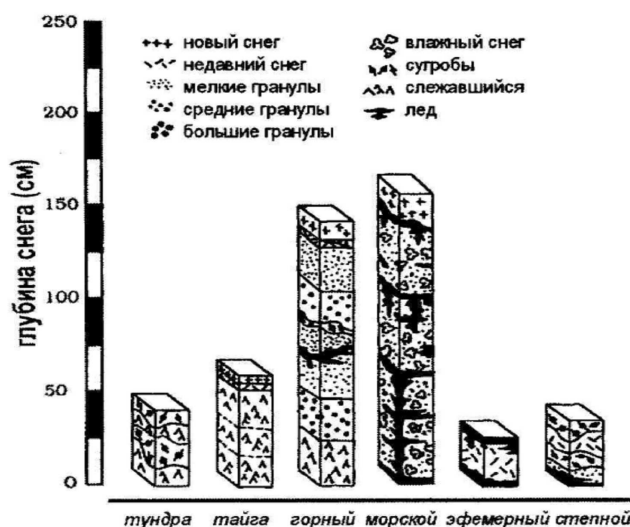


Рис. 1. Стратиграфия классов снежного покрова по [1].

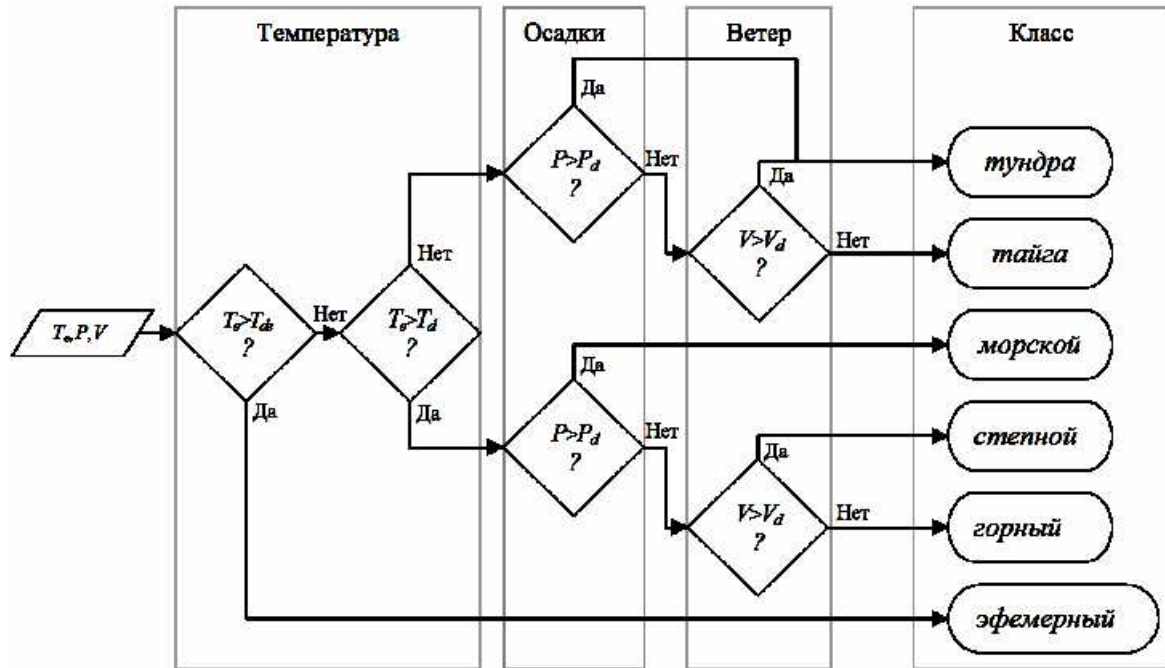


Рис. 2. Блок-схема алгоритма вычисления классов снега:  $T_e$  — температура приземного слоя воздуха, °C;  $P$  — интенсивность осадков, мм/день;  $V$  — скорость ветра, м/с;  $T_d, P_d, V_d$  — критические величины для температуры приземного воздуха, осадков и ветра.

определение интервала осреднения и критических параметров, используемых при сравнении. В экспериментах, результаты которых приведены ниже, использовалось осреднение за трехмесячный интервал, предшествующий расчетному моменту. Критические константы, использованные для климатической и динамической классификаций, подобраны в результате многочисленных предварительных экспериментов (табл. 1). Можно видеть, что они отличаются от критических коэффициентов климатической классификации в основном для осадков.

Один из критериев разумности динамической классификации, которым мы пользовались при получении критических коэффициентов, — это соображение, что для конца зимы в Северном полушарии на этапе окончания формирования снежного покрова распределение площади каждого класса должно быть близким к распределению классов по [1], которые, как уже упоминалось, во многих регионах мира сравнивались с вертикальными снежными шурфами. Близость относительных площадей в феврале в динамической классификации к относительным площадям в климатической классификации можно видеть

Т а б л и ц а 1. Критические значения, используемые для динамической и климатической классификаций и интервалы усреднения

Тип	Температура $T_d, °C$	Осадки $P_d, мм/день$	Ветер $V_d, м/с$	Интервалы усреднения
Климатическая [2]	125	2	Растительность	1 год
Климатическая [3]	125	1.9	«	«
Климатическая [4]	125	0.9	«	«
Динамическая	120	1.7	1	3 месяца

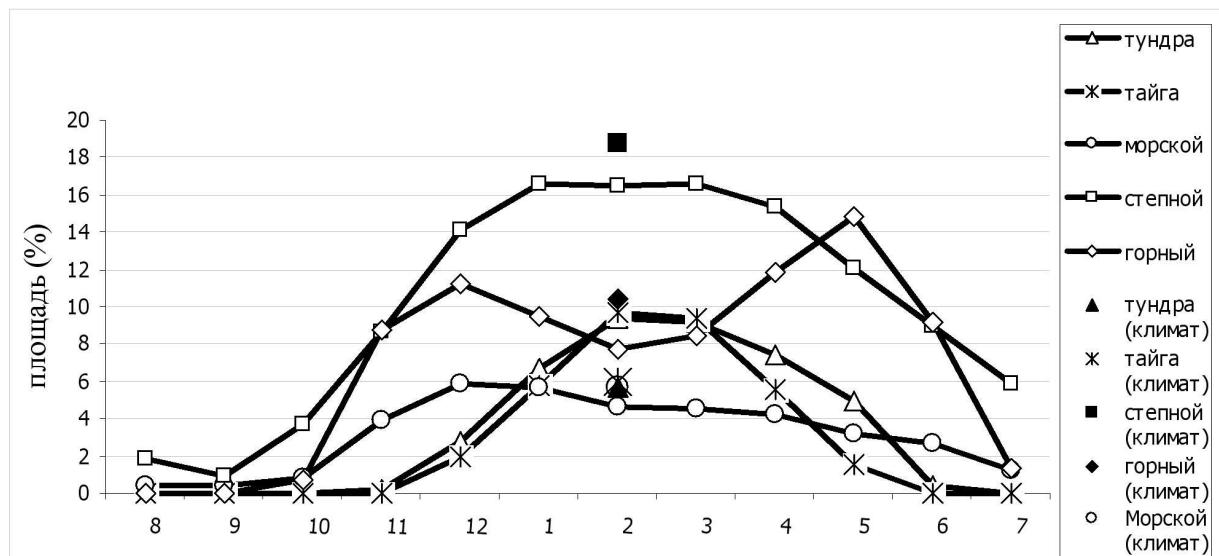


Рис. 3. Годовой ход доли площади, покрытой снегом различных классов в Северном полушарии, полученный по “динамической” (Д) и “климатической” (К) классификациям в феврале.

на рис. 3, где представлен годовой ход доли площадей, покрытых снегом различных классов. Годовой ход площадей, занятых каждым классом снега, получен по среднемесячным многолетним значениям температуры приземного воздуха, количеству осадков и скорости ветра из реанализа ERA [4].

В целом метод получения динамической классификации реалистично отражает динамику доли площади снежного покрова: снег устанавливается в период с сентября по октябрь, таяние и сход продолжаются с марта по июль. Установление снежного покрова начинается с классов *степной* и *горный* с характерными для начала зимы высокой температурой и малым количеством накопившихся осадков. Далее, в ноябре, возрастает доля класса *морской*, которому соответствует большое количество еще относительно теплого снега. С декабря по февраль происходит установление классов *тайга* и *тундра*, характерных для низких температур середины и конца зимы. Максимумы для классов приходятся: на декабрь — для *степного* и *морского*, на февраль — для *тайги* и *тундры*, у класса *горный* наблюдаются два выраженных максимума — в декабре и в мае, что можно объяснить в первую очередь довольно высокими температурами, при которых снег лежит на земле, и малым количеством осадков в виде снега. К июлю весь снежный покров практически сходит.

## 2. Результаты численного эксперимента с моделью общей циркуляции атмосферы Гидрометцентра России с альбедо снега, зависящим от класса снежного покрова

Снег оказывает большое влияние на изменение свойств подстилающей поверхности. В частности, при выпадении снега резко изменяется альбедо поверхности. На величину альбедо влияют “возраст” снежного покрова, его влажность, плотность, структура поверхно-

Т а б л и ц а 2. Значения альbedo снега в соответствии с классом

Класс	Тундра	Тайга	Горный	Морской	Эфемерный	Степной
Альbedo	0.80	0.74	0.66	0.60	0.67	0.61

сти, на которую он выпадает. Отражательная способность снежного покрова изменяется под влиянием процессов оседания и уплотнения снега, перекристаллизации, таяния и др. Поверхность, покрытая сухим чистым снегом, отражает до 80 % солнечной радиации, для рыхлого и стаявшего снега этот процент ниже. Поэтому для каждого класса снега в динамической классификации задается соответствующее альbedo.

В данном разделе приведены предварительные результаты численных экспериментов с версией модели общей циркуляции атмосферы Гидрометцентра России, описание которой и результаты ряда экспериментов даны в работах [5, 6]. Эксперимент по протоколу AMIP (Проект сравнения моделей атмосферы) проведен на десять лет.

В модели Гидрометцентра России влияние снега на альbedo рассчитывается по формуле

$$a = a_l + (a_s - a_l)sn / (sn + sn_{cr}), \tag{1}$$

где  $sn$  — толщина снежного покрова в водном эквиваленте;  $sn_{cr}$  — критическое значение толщины снежного покрова, равное 0.01 м;  $a_l$  — альbedo бесснежной поверхности;  $a_s$  — альbedo соответствующего класса снежного покрова (табл. 2). Здесь мы анализируем только непосредственное влияние альbedo различных классов на интегральное за срок всего эксперимента альbedo.

При анализе полученных результатов рассматривались глобальные, полусферные и зональные средние альbedo по широтным зонам в 10° для суши. Экспериментальные ве-

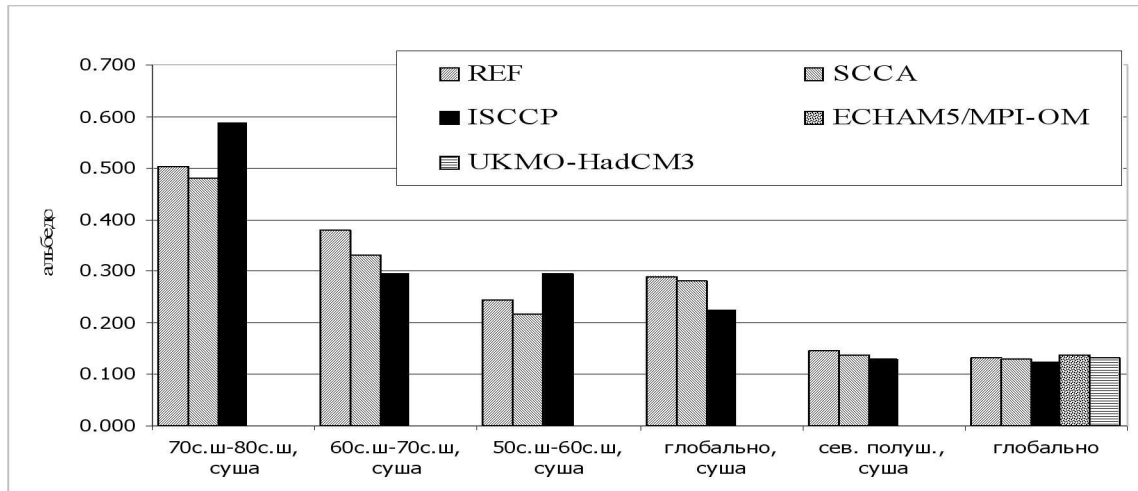


Рис. 4. Средние значения альbedo для различных регионов суши для двух экспериментов с моделью Гидрометцентра России и альbedo по спутниковым измерениям (ISCCP) и ряда зарубежных моделей. Обозначения: REF — базовый эксперимент с версией T40L15 модели Гидрометцентра России, SCCA — эксперимент с той же версией и с учетом изменения альbedo в соответствии с классом снега, ISCCP — эталонные данные [7], UKMO-HadCM3 — альbedo из AMIP — эксперимента с моделью Метеорологической службы Великобритании [8, 9], ECHAM5/MPI-OM — Модель института Планка в Германии [10, 11].

личины альbedo сравнивались с эталоном (рис. 4), в качестве которого взято альbedo, полученное в рамках проекта “International Satellite Cloud Climatology Project” (ISCCP) (Международный проект по облачной климатологии) [7]. Результаты сравнения приведены на диаграмме (рис. 4). Можно видеть, что среднее по глобусу (последние столбики) альbedo близко к эталону, но несколько выше его. Учет разнообразия альbedo снега приближает интегральное альbedo к эталону. Там же нанесено интегральное альbedo поверхности двух наиболее известных климатических моделей. Видно, что альbedo поверхности в эксперименте с учетом стратиграфии снега ближе к эталону, чем все остальные модели. Наибольшие расхождения с эталонным альbedo наблюдаются в регионах 70–80 с.ш. и 50–60 с.ш. Это расхождение объясняется возможным завышением альbedo для классов *тундра* и *степной*, которые преобладают на этой территории. Предполагается в дальнейшем провести эксперименты с изменением этих величин.

## Заключение

Разработан алгоритм динамической классификации снежного покрова, отражающий сезонное изменение распределения снега по классам. Показано, что динамическая классификация сохраняет основные интегральные свойства снежного покрова в период его формирования, залегания и схода.

Динамическая классификация внедрена в модель общей циркуляции Гидрометцентра России. В работе приведены результаты первых экспериментов с учетом влияния альbedo в зависимости от классов снега. В них в процессе расчетов по модели общей циркуляции атмосферы Гидрометцентра России определялись классы снежного покрова и каждому классу приписывалось различное значение альbedo. Показано, что на большей части Северного полушария альbedo подстилающей поверхности приблизилось к эталонным величинам по сравнению с базовым экспериментом. Так как альbedo подстилающей поверхности заметно влияет на энергетику атмосферы, улучшились (приблизились к эталонам) и средние величины температуры и осадков, но эти результаты в публикации не приведены.

## Список литературы

- [1] STURM M., HOLMGREN J., LISTON G.E. A seasonal snow cover classification system for local to global applications // J. of Climate. 1995. Vol. 8(5). P. 1261–1283.
- [2] LEGATES D.R., WILLMOTT C.J. Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected, global precipitation // Intern. J. Climatol. 1990. Vol. 10. P. 111–127.
- [3] KALNAY E., KANAMITSU M., KISTLER R. ET AL. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. Vol. 77, N 3. P. 437–470.
- [4] GIBSON R., KALLBERG P., UPPALA S. ET AL. ERA Description, ECMWF Re-analysis Project Report Series. Vol. 1. Europ. Centre for Medium-Range Weather Forecasts. 1997. 72 p.
- [5] РУБИНШТЕЙН К.Г., ЕГОРОВА Е.Н. Оценка воспроизведения годового хода характеристик атмосферы и суши моделью общей циркуляции атмосферы // Тр. Гидрометцентра России. 2000. № 33. С. 41–98.

- [6] РУБИНШТЕЙН К.Г., ГРОМОВ С.С. Воспроизведение характеристик снежного покрова в моделях общей циркуляции атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. (В печати).
- [7] INTERNATIONAL Satellite Cloud Climatology Project: <http://isccp.giss.nasa.gov>
- [8] ROESCH A. Evaluation of surface albedo and snow cover in AR4 coupled climate models // J. Geophys. Res. 2006. 111, D15111, doi: 10.1029/2005JD006473.
- [9] GATES W.L. An overview of AMIP and preliminary results // Proc. of the First Intern. AMIP Sci. Conf. Monterey, California. USA. 15–19 May 1995. WMO/TD-N 732. P. 1–8.
- [10] REPORT N 6. The ECHAM3 Atmospheric General Circulation Model. Edited by: Deutsches Klimarechenzentrum. Modellbetreuungsgruppe. Hamburg, Sept. 1993. Revision 2.
- [11] ROECKNER E. ET AL. Simulation of the Present-day Climate With the ECHAM Model: Impact of Model Physics and Resolution. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, Germany. Report N 93. 1992.

*Поступила в редакцию 9 ноября 2006 г.*