

*К. Г. Рубинштейн, М. В. Золоева*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИНАМИКИ КЛАССОВ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ДЛЯ ВАЛИДАЦИИ МОДЕЛИ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ**

### **Введение**

При моделировании изменения климата один из наиболее тонких и сложных моментов — воспроизведение обратных связей климатической системы с максимальной близостью к природе. В свою очередь, сезонный снежный покров — один из важнейших механизмов обратной связи в климатической системе. При появлении снежного покрова радикально меняется энергетика атмосферы.

Снег — очень динамичный элемент, свойства которого зависят от условий выпадения, времени, термических и динамических режимов существования. Основными свойствами снежного покрова, определяющими взаимодействие снежного покрова и атмосферы, являются альbedo снега, его теплоемкость и теплопроводность.

Задача данной работы — использовать схематизацию разнообразия физического описания снежного покрова для настройки годового хода альbedo подстилающей поверхности и гидродинамической модели за счет учета его вертикальной структуры и изменения физических свойств снега в соответствии с типом. Вертикальная структура (стратиграфии) снега в гидродинамической модели учтена при помощи так называемой динамики классов снежного покрова. Метод классификации снежного покрова (в дальнейшем называемый климатическим) основан на идеях, предложенных в работе М. Штурма [9] для классификации климатического снежного покрова. В нем для определения класса снега использован анализ изменения трех метеорологических параметров за предшествующий формированию снега интервал времени: 1) приземной температуры воздуха, 2) осадков, 3) ветра. Такой метод классификации снежного покрова выгодно отличается от многочисленных предшествующих методов тем, что тип снега определяется по истории изменения метеорологических параметров, а не по свойствам самого снега. Другое достоинство предложенного метода — выделение относительно небольшого числа классов, которые, в общем, в достаточно условном виде представляют реальные типы вертикальной структуры снежного покрова.

В статье кратко описан алгоритм динамической классификации и приведены первые результаты его использования для валидации разработанной в Гидрометцентре России модели общей циркуляции атмосферы.

### Расчет динамики классов снежного покрова

Предложенная в работе [9] классификация снежного покрова, полученная по климатическим значениям температуры приземного воздуха, осадков и ветра, характеризует снежный покров, сформировавшийся с середины до конца зимы. В соответствии с различиями в характерной вертикальной структуре снежный покров разбит на шесть классов:

- 1) «тундровый»,
- 2) «таежный»,
- 3) «горный»,
- 4) «степной»,
- 5) «морской»,
- 6) «эфемерный».

Названия классов взяты в кавычки, так как они определяют только свойства снега и не привязаны напрямую к климато-географическим зонам и их появление возможно в совершенно других регионах. Типичная стратиграфия для каждого класса снега, следуя [9], приведена на рис. 1. В системе классификации учтен период залегания снега, условия его формирования и глубина снежного покрова, наличие ледяных вкраплений и слоев и другие свойства. Заметно, что по своей вертикальной структуре классы сильно различаются. В связи с этим различаются альbedo снежной поверхности, теплопроводность и теплоемкость снега.

В работе [9] построено глобальное распределение классов, которое используется в оперативной практике определения свойств снежного

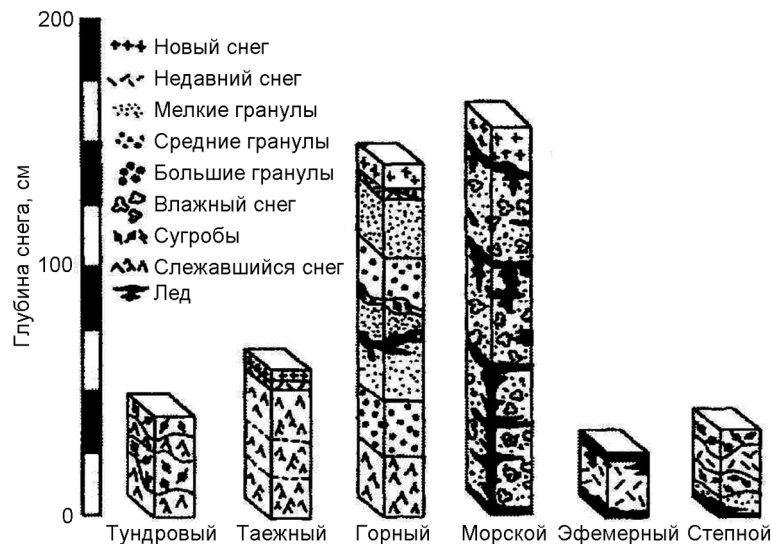


Рис. 1. Стратиграфия классов снежного покрова [9].

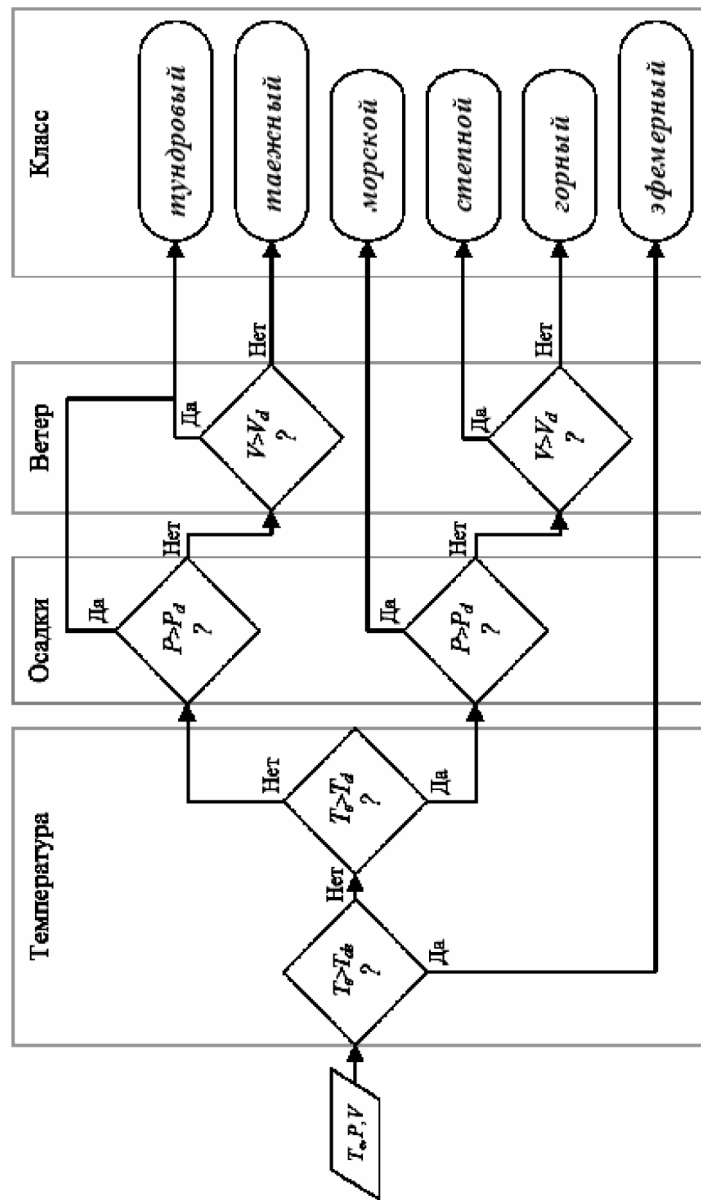


Рис. 2. Блок-схема алгоритма вычисления классов снега.

покрова при расшифровке спутниковой информации NOAA (США). В ней же предложен формальный алгоритм определения класса снежного покрова, классификация снега проведена для годового интервала осреднении метеорологических переменных [8]. В ряде регионов мира, в том числе на Аляске, Штурм [9] сверял свою классификацию с реальной стратиграфией в шурфах и таким образом подбирал критические значения для климатической классификации, в большой мере определяющие класс снега. Итак, определение классов снежного покрова в климатической классификации основано на сравнении среднегодовых значений метеорологических величин (приземной температуры воздуха, интенсивности осадков и скорости ветра) с соответствующими критическими значениями. Блок-схема этого алгоритма приведена на рис. 2, а сам алгоритм подробно описан в работе [9]. В своей публикации мы рассмотрим только особенности алгоритма, использованного в рамках нашей модели.

При разработке метода расчета динамики типов снега для произвольного интервала времени ключевым моментом является определение интервала осреднения и критических метеорологических параметров, используемых в алгоритме. В экспериментах, результаты которых приведены далее, применялось осреднение за трехмесячный интервал, предшествующий расчетному моменту. Критические константы для климатической и динамической классификации подобраны в результате многочисленных предварительных экспериментов и приведены в табл. 1. Заметно, что они отличаются от критических коэффициентов климатической классификации в основном для осадков.

Один из критериев разумности динамической классификации, который мы использовали при получении критических коэффициентов, — 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 работе [9]. Близость относительных площадей в феврале в динамической классификации к относительным площадям в климатической заметна на рис. 3. Годовой

Таблица 1

**Константы, используемые для динамической и климатической классификации и интервалы усреднения**

Тип классификации	Температура $T_d$ , °С	Осадки $P_d$ , мм/сут	Скорость ветра $V_d$ , м/с	Интервал усреднения
Климатическая [8]	125	2	—	1 год
Климатическая [7]	125	1,9	—	1 год
Климатическая [6]	125	0,9	—	1 год
Динамика классов	120	1,7	1	3 месяца

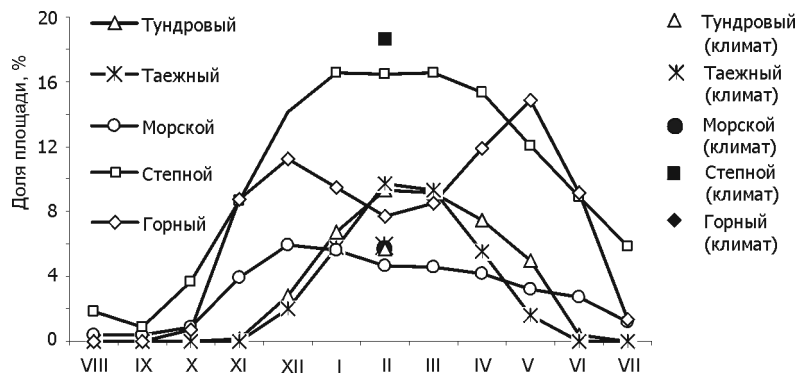


Рис. 3. Годовой ход доли площади, покрытой снегом различных классов («динамика» классов) в северном полушарии и доли площади в феврале полученные по среднегодовым осреднениям метеорологических параметров.

ход площадей, занятых снегом каждого класса, получен по среднемесячным многолетним значениям температуры приземного воздуха, осадкам и ветру из реанализа ERA [6]. По сути, данный график демонстрирует степень реалистичности динамики классов, которую отражают доли площади, занятой каждым классом снега: снежный покров устанавливается с сентября по октябрь, таяние и сход продолжают с марта по июль. Установление снежного покрова начинается в большинстве регионов с возникновения снега классов «степной» и «горный», так как для них характерны более высокие суммы значений температуры в начале зимы и меньшие количества накопившихся осадков. Далее в ноябре возрастает доля снега класса «морской», которому соответствует большое количество еще относительно теплого снега. С декабря по февраль формируется снег классов «таежный» и «тундровый», характерных для более низких сумм значений температуры середины и конца зимы. Максимумы для площадей, занимаемых снегом различных классов, приходятся:

- для «степного» и «морского» — на декабрь,
- для «таежного» и «тундрового» — на февраль,
- для «горного» — на декабрь и май,

Два выраженных максимума для «горного» снега можно объяснить в первую очередь довольно высокими суммами значений температуры, при которых снег еще лежит на земле весной, и малым количеством осадков в виде свежего снега, необходимого для существования данного типа. К июлю весь снежный покров практически сходит, что проявляется в наличии только некоторой площади снега типа «эфемерный».

**Предварительные результаты численных экспериментов  
по валидации модели общей циркуляции атмосферы  
при помощи динамики физических характеристик  
классов снежного покрова**

Как уже отмечено, снег оказывает большое влияние на изменение свойств подстилающей поверхности. В частности, при выпадении снега резко изменяется альbedo поверхности. На альbedo влияет «возраст» снежного покрова, т. е. время между снегопадами, а также его влажность, плотность, структура поверхности, на которую он выпадает. Альbedo изменяется под влиянием оседания и уплотнения снега, перекристаллизации, таяния и др. Поверхность, покрытая сухим чистым снегом, отражает до 80 % солнечной радиации, для рыхлого и стаявшего снега эта доля меньше. Поэтому для каждого класса снега в динамической классификации задается соответствующее альbedo.

На теплоемкость и теплопроводность снежного покрова также влияют влажность, плотность и структура снега. Кроме того, в толще снежного покрова могут возникать фазовые переходы в виде таяния, возгонки и т. д., что изменяет вид уравнения теплового баланса. К сожалению, подробная информация о тепловых свойствах снега приведена только в изданиях полувековой давности, например в работах [1, 4].

Исходя из приписываемой Штурмом [9] каждому классу средней плотности, рассчитаны средние значения теплоемкости и теплопроводности соответствующего класса снега (табл. 2).

В этом разделе мы представим предварительные результаты трех численных экспериментов с версией T42L15 разработанной в Гидрометцентре России модели общей циркуляции атмосферы, описание которой и результаты ряда экспериментов приведены в работах [2, 3]. Каждый эксперимент проводился по протоколу AMIP (проект сравнения

Таблица 2

**Характеристики снега каждого класса**

Характеристика	«Тундровый»	«Таежный»	«Морской»	«Эфемерный»	«Степной»	«Горный»
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	310	200	350	—	180	220
Альbedo, 0,90	0,90	0,70	0,5	0,76	0,87	
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,3618	0,1692	0,3068	—	0,2568	0,2256
Теплоемкость, 10 <sup>5</sup> Дж/(м <sup>3</sup> ·К)	2,5	1,1	2,6	—	1,2	1,4

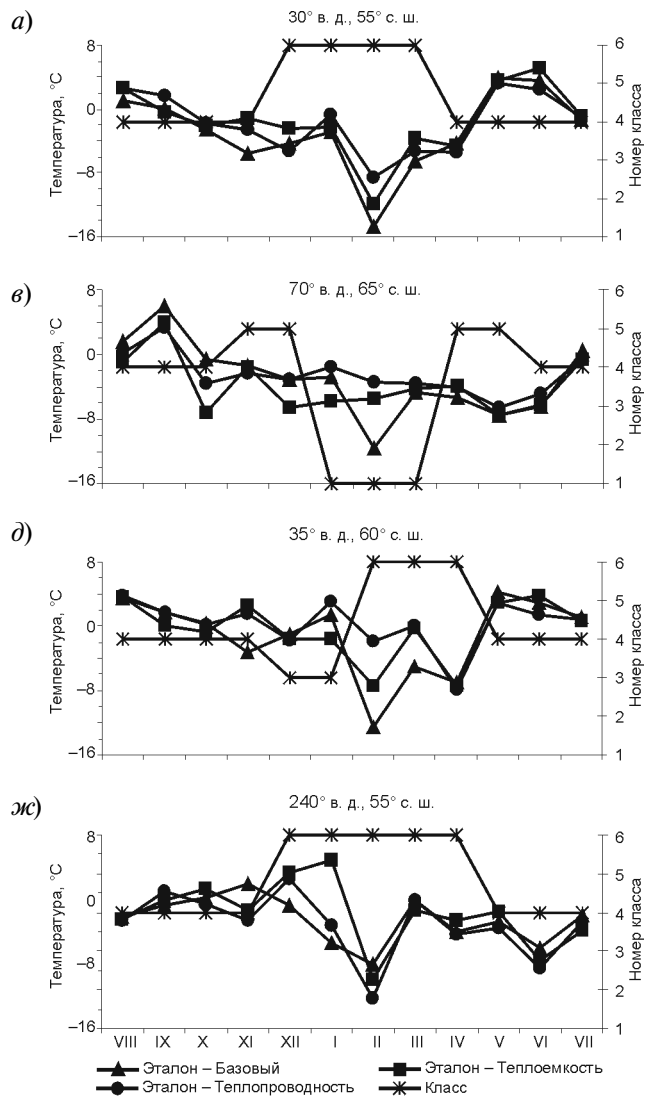
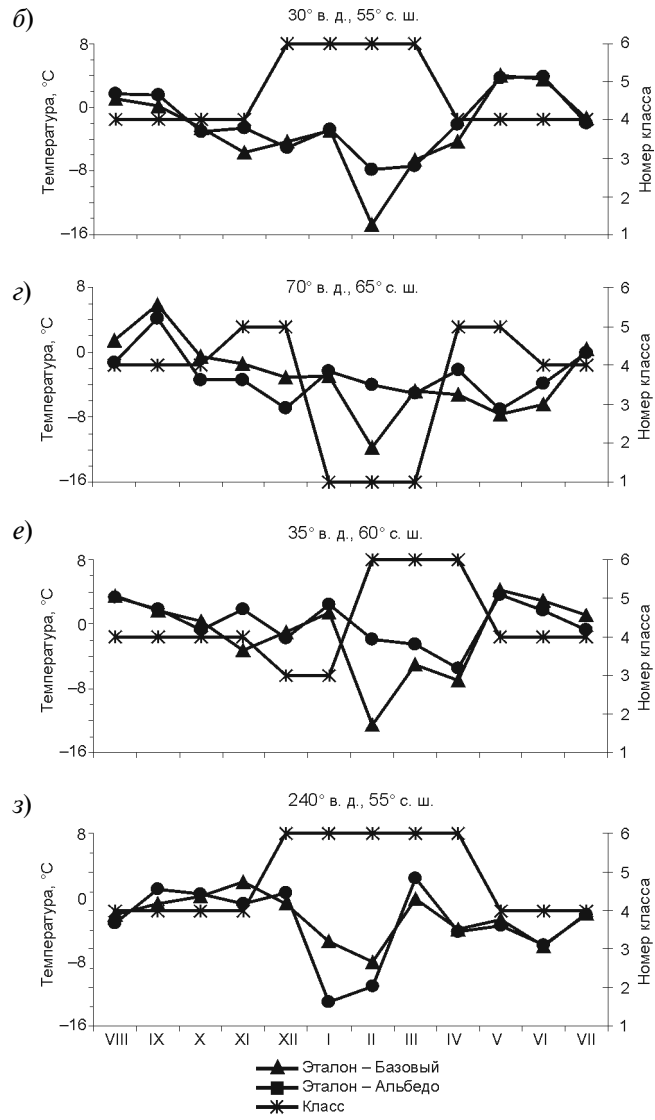


Рис. 4. Годовой ход разностей температуры приземного воздуха эталона эксперимента, а также эталона и экспериментов с изменением северного



(температуры на уровне 2 м из реанализа NCAR/NCEP) минус «базовый» свойств соответствующих классов снежного покрова для ряда точек полушария.



моделей атмосферы) [5] 2 года. Задача каждого эксперимента — определить влияние различных физических характеристик снежного покрова на приземную температуру воздуха.

Теплоемкость и теплопроводность снега каждого класса менялась по мере его появления в каждой точке.

Так как альbedo в каждой точке в модели зависит от толщины снежного покрова, поясним учет снежного покрова в экспериментах.

В модели Гидрометцентре России влияние снега на альbedo рассчитывается по формуле

$$a = a_l + (a_s - a_l)sn/(sn + sn_{кр}),$$

где  $sn$  — толщина снежного покрова в водном эквиваленте,  $sn_{кр} = 0,01$  м — критическая толщина снежного покрова,  $a_l$  — альbedo бесснежной поверхности,  $a_s$  — максимальное альbedo снега для соответствующего класса (см. табл. 2).

В данной публикации мы не приводим полный анализ результатов численных экспериментов с учетом различных классов, а анализируем только непосредственное влияние теплоемкости, теплопроводности и альbedo различных классов снега на годовой ход альbedo и температуры приземного воздуха. При анализе полученных результатов, приведенных в данной публикации, выбраны серии отдельных характерных точек, в которых с определенной очередностью менялись типы снега. В этих точках рассчитаны разности в изменении годового хода температуры приземного воздуха эталонного эксперимента и эксперимента с изменением характеристик снежного покрова.

Рассмотрим рис. 4 *а* и *б*. Видно, что до ноября и после апреля наблюдался так называемый «эфемерный» тип снега и, по сути, никакого значительного эффекта от изменения свойств снега не проявляется. В интервале от декабря до марта в этой точке возник снежный покров типа «степной». Заметно, что именно зимой отклонения от эталона температуры достигали в экспериментах  $15$  °С. Видно также, что изменение теплоемкости и теплопроводности снега в соответствии с классом привело к уменьшению среднемесячного отклонения от эталона более чем на  $8$  °С. Еще больший эффект от приближения к эталону альbedo для этой же точки заметен на рис. 4 *б*. Если эти эффекты в эксперименте с учетом всех трех эффектов будут суммарными, то можно надеяться, что даже в феврале приземная температура значительно приблизится к эталону.

На рис. 4 *в* и *г* приведены еще более яркие аналогичные результаты для точки Западно-Сибирской равнины ( $70^\circ$  в. д.,  $65^\circ$  с. ш.), в соответствии с которыми ноябрь, декабрь, апрель и май характеризовались

«степным» типом снега, а январь, февраль, март — «тундровым». Причем заметно, что при «степном» типе введение другой теплоемкости даже несколько ухудшило результаты по сравнению с базовым вариантом. Пример заметного приближения к эталону виден также на рис. 4 *д* и *е* для точки вблизи Санкт-Петербурга (35° в. д., 60° с. ш.), на которых «морской» тип снега в декабре и январе сменился на «горный» в феврале, марте и апреле. Среднемесячные изменения в январе, феврале и марте достигали 4—6 °С.

На рис. 4 *ж* и *з* приведен пример для точки на севере США (240° в. д., 55° с. ш.), в которой все три эксперимента при появлении устойчивого «морского» типа снега в течение всей зимы и весны привели к некоторому увеличению отклонения температуры от эталона. Из проанализированного значительного числа точек и областей можно сказать, что большая часть заснеженных территорий улучшает свои термические свойства, но имеется часть точек, где этого эффекта не происходит. Мы предполагаем, что это связано с тем, что назначение классов в наших экспериментах проводилось не по внутренним параметрам модели (температуре приземного воздуха, ветру и осадкам), а по климатическим величинам и, в какой-то мере, навязывалось извне.

В дальнейшем предполагается алгоритм расчета типов вычислять в каждой точке модельной области независимо от результатов моделирования.

### Выводы

На основе классификации [4] 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 была внедрена в модель общей циркуляции атмосферы Гидрометцентра России (Т42L15). В работе приведены результаты первых экспериментов с учетом влияния альbedo, теплоемкости и теплопроводности снега 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 характеристик снежного покрова. В работе 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 из-за недостатка места.

Работа выполнена при частичной поддержке следующими грантами: INTAS 03—51—5296, РФФИ 04—05—64151, 05—05—08018 — ОФИ, 06—05—64104, NATO ESP CLG 981842.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин П. П. Физические свойства снежного покрова. — Л.: Гидрометеоиздат, 1957. — 178 с.
2. Рубинштейн К. Г., Громов С. С., Игнатов Р. Ю. Оценка воспроизведения характеристик снежного покрова в моделях общей циркуляции атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2007. — № 3. — С. 1—15.
3. Рубинштейн К. Г., Егорова Е. Н. Оценка воспроизведения годового хода характеристик атмосферы и суши моделью общей циркуляции атмосферы // Тр. ГМЦ РФ. — 2000. — № 33. — С. 41—98.
4. Снег / Под ред. Д. М. Грея, Д. Х. Мэйла. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 751 с.
5. Gates W. L. An overview of AMIP and preliminary results // Proc. The I Intern. AMIP sci. conf. (Monterey, California, USA, 15—19 May 1995). — 1995. — WMO/TD-No. 732. — P. 1—8.
6. Gibson R., Kallberg P., Uppala S., Hernandez A. et al. ERA description, ECMWF Re-analysis Project Report Series. Vol. 1. — Reding: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 1997. — P. 72.
7. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. — 1996. — N 77(3). — P. 437—470.
8. Legates D. R., Willmott C. J. Mean seasonal and spatial variability in gauge — corrected, global precipitation // Int. J. Climatol. — 1990. — N 10. — P. 111—127.
9. Sturm M., Holmgren J., Liston G. E. A seasonal Snow Cover Classification System for Local to Global Applications // J. Climate. — 1995. — Vol. 8 (5). — P. 1261—1283.