

# СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СНЕЖНОГО ПОКРОВА ДЛЯ БАССЕЙНОВ ВЕЛИКИХ СИБИРСКИХ РЕК ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И РЕАНАЛИЗОВ\*

К. Г. РУБИНШТЕЙН, С. С. ГРОМОВ, В. М. ХАН, Р. Ю. ИГНАТОВ  
*Гидрометцентр России, Москва*  
e-mail: rubin@mecon.ru, gromov@mecon.ru

Reanalysis of NCAR/NCEP and ERA characteristics of snow cover is examined. It is compared with the results of numerical experiments of the AMIP type by the Hydrometcentre of Russia, INM RAS and MGO. It is shown, that the mean snow cover area for Ob, Enisey and Lena regions is predicted satisfactorily by all models. During autumn — winter season, and during the season of snow melting the HMC-experiments are near for etalon. Comparison of snow depth anomalies from station data set and from different reanalysis data, shows that ERA data has higher correlation coefficient, than NCAR/NCEP.

## Введение

Количество работ, посвященных исследованию динамики характеристик снежного покрова в северных регионах, в последнее время постоянно растет (см., например, [1–7]). Адекватное описание снежного покрова особенно важно при моделировании климата, так как снег является одним из сильнейших сезонных механизмов обратной связи в системе атмосфера — подстилающая поверхность. В публикациях [2, 5, 6] анализировались интегральные по Евразии и Северной Америке характеристики снежного покрова, полученные в экспериментах типа AMIP (Atmospheric Models Intercomparison Project — Проект сравнения моделей атмосферы) [9]. Анализ региональных характеристик снега является одновременно и анализом всех региональных гидрологических и термических зимних характеристик.

В данной работе мы приводим сравнение характеристик снежного покрова по эмпирическим данным, результатам реанализов и результатам численных экспериментов типа

---

\*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 03-05-64312, № 04-05-64151, № 04-05-65099), а также INTAS (грант № 03-51-5296).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2005.

АМІР-2 (вторая фаза эксперимента) с характеристиками, полученными с использованием российских гидродинамических моделей, осредненными по водосборам трех великих сибирских рек — Оби, Енисея и Лены.

## 1. Описание данных, использованных для анализа

В работе использовались параметры снежного покрова, полученные в экспериментах, проведенных по протоколу АМІР-2, — второй фазы международной программы по сравнению моделей общей циркуляции атмосферы [9]. В нашем распоряжении имелись ряды глобальных полей водного эквивалента снега в АМІР-2 экспериментах с моделью Гидрометцентра России (далее ГМЦ). Кроме того, нам были любезно предоставлены аналогичные характеристики по воспроизведению снежного покрова в экспериментах АМІР-2 двух российских моделей, официальных участников программы АМІР, — Института вычислительной математики РАН (ИВМ) [10] и Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО) [1]. В качестве эталонов в работе мы использовали данные снегомерных измерений по Сибири, предоставленные нам сотрудниками лаборатории климата Института географии РАН. Также проведено некоторое сравнение характеристик снежного покрова, полученных в реанализах NCAR/NCEP (Национального центра атмосферных исследований, США) [7] версии 1 и 2 и реанализе ERA-40 ECMWF (Европейского центра среднесрочного прогноза погоды) [9].

## 2. Анализ изменения средних характеристик площади снежного покрова в бассейнах великих сибирских рек

На рис. 1 приведен годовой ход средних за 20 лет изменений площади, покрытой снегом, по данным реанализов ERA и NCAR/NCEP-2 и по результатам АМІР-экспериментов моделей Гидрометцентра России, ГГО и ИВМ, а также годовой гидрограф стоков рек Оби, Енисея и Лены. Из анализа этих графиков можно видеть, что годовые изменения осредненных за 20 лет величин площади покрытия снегом по данным реанализов и по численным экспериментам трех моделей в целом близки друг к другу. Они практически совпадают по площади установившегося зимнего снежного покрова. Внутригодовые изменения площади снежного покрова хорошо коррелируют с обратным знаком с осредненными характеристиками годового изменения стока рек.

Видно, что накопление снега и таяние в западной, центральной и восточной частях Сибири (водосборы Оби, Енисея и Лены соответственно) протекает по-разному. В большой мере это связано с различным характером годового хода температуры и осадков в каждом из регионов. Мы, к сожалению, не имели соответствующих полей приземной температуры воздуха и осадков для всех моделей, а использовали только эмпирические данные и результаты эксперимента с моделью ГМЦ. Эти данные, осредненные по тому же интервалу времени и тем же бассейнам, приведены на рис. 2. Ниже, при более детальном анализе результатов рис. 1, будем прибегать и к рассмотрению рис. 2. При этом эталонными данными для приземной температуры воздуха нам служили ряды температуры на уровне 2 м NCAR/NCEP реанализа, а для осадков — данные GPCP (Глобального проекта климатических осадков).

## 2.1. Анализ формирования снежного покрова в осенний период

Изменение массы снежного покрова является отражением термических и гидрологических свойств атмосферы и суши. Как уже упоминалось, средние термические характеристики в бассейнах рек, приведенные на рис. 2, вполне удовлетворительно описываются в эксперименте с моделью ГМЦ. Можно видеть, что в АМІР-эксперименте в бассейнах Оби и Енисея температуры зимой и осенью на несколько градусов выше наблюдений. В бассейне р. Лены температуры ближе к наблюдениям и отличия заметны только в ноябре — январе. Осадки в эксперименте с моделью ГМЦ завышены во всех сезонах приблизительно в 1.5 раза. В осенне-зимний период осадки хорошо совпадают с наблюдаемыми, особенно в бассейне р. Оби. Осадки именно этого сезона определяют формирование снежного покрова.

Из анализа рис. 1 видно, что в среднем снежный покров формируется в бассейне р. Оби начиная с сентября, а с ноября до середины марта он практически не меняется. Причем накопление снега протекает вполне равномерно. В бассейне Енисея формирование снежного покрова протекает интенсивнее в первую половину осени и несколько медленнее в конце осени. На Лене в среднем снег ложится чуть ли не на месяц раньше и, судя по данным реанализов, к концу октября его формирование практически заканчивается. Снег на Лене держится на месяц дольше, почти до мая — июня.

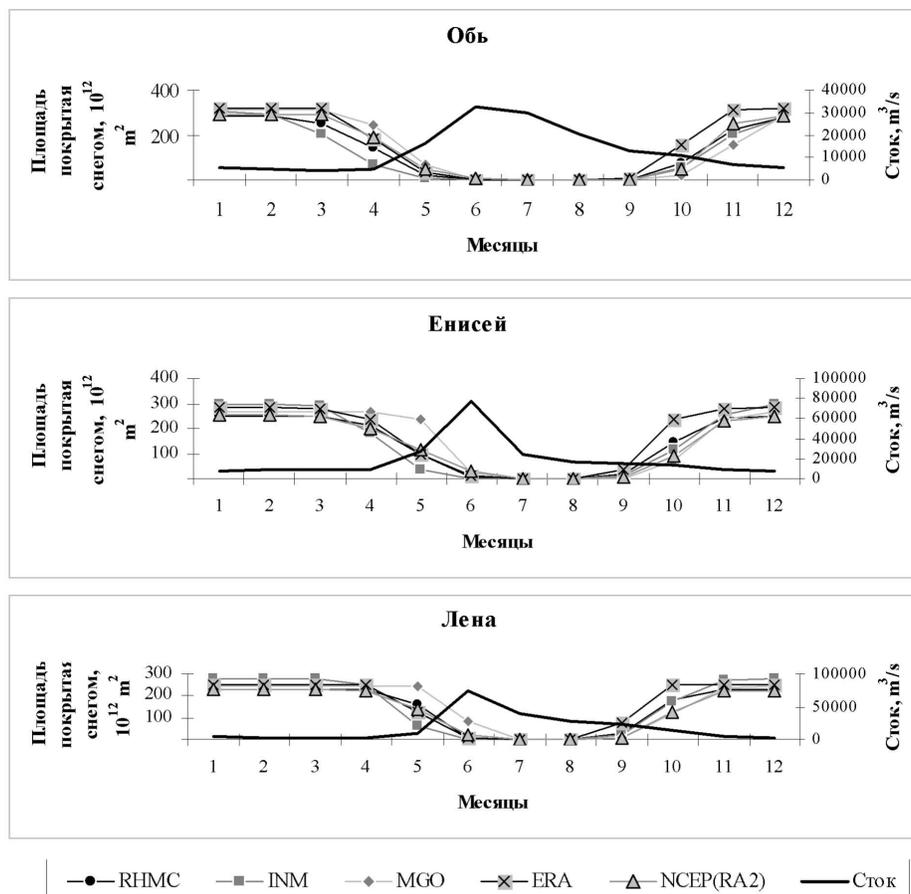


Рис. 1. Средние за 20 лет годовые изменения площади снежного покрова (левая шкала) по данным реанализов ERA, NCAR/NCEP и результатам АМІР-экспериментов по моделям ГМЦ, ИВМ и ГГО и средний за тот же интервал сток рек (правая шкала).

Объяснение различий в процессе накопления снега связано, естественно, с термическими и гидрологическими особенностями регионов. Обратимся опять к рассмотрению рис. 2. В течение всего периода формирования снежного покрова средняя температуры в бассейне Оби на 3–4 градуса выше температуры в бассейне Енисея, а температуры для бассейна Енисея на 4–5 градусов выше средней температуры бассейна Лены. Можно заметить также, что средний термический режим во всех трех бассейнах воспроизведен в эксперименте с моделью Гидрометцентра весьма близко к данным реанализа. Характерное распределение осадков в период образования снежного покрова также приводится на рис. 2. Большие величины осадков в течение всего осенне-зимнего периода соответствуют бассейну р. Оби, несколько меньшие величины — бассейну р. Енисей и еще меньшие — р. Лене. Заметим также, что взаимное соотношение величин осадков по регионам воспроизведено аналогично соотношению осадков по данным GPCP, в то время как абсолютные величины осадков в эксперименте завышены почти во все сезоны и для всех трех бассейнов. Более низкие температуры в бассейне р. Лены в сентябре приводят к более раннему формированию снежного покрова в Восточной Сибири. Скорость роста снежного покрова выше в первые месяцы в бассейне р. Лены, чуть ниже в бассейне р. Енисей и самая низкая в бассейне р. Оби.

Формирование снежного покрова для бассейнов Оби и Енисея, воспроизводимое моделью ГГО, происходит медленней, чем в модели Гидрометцентра России. Средние ве-

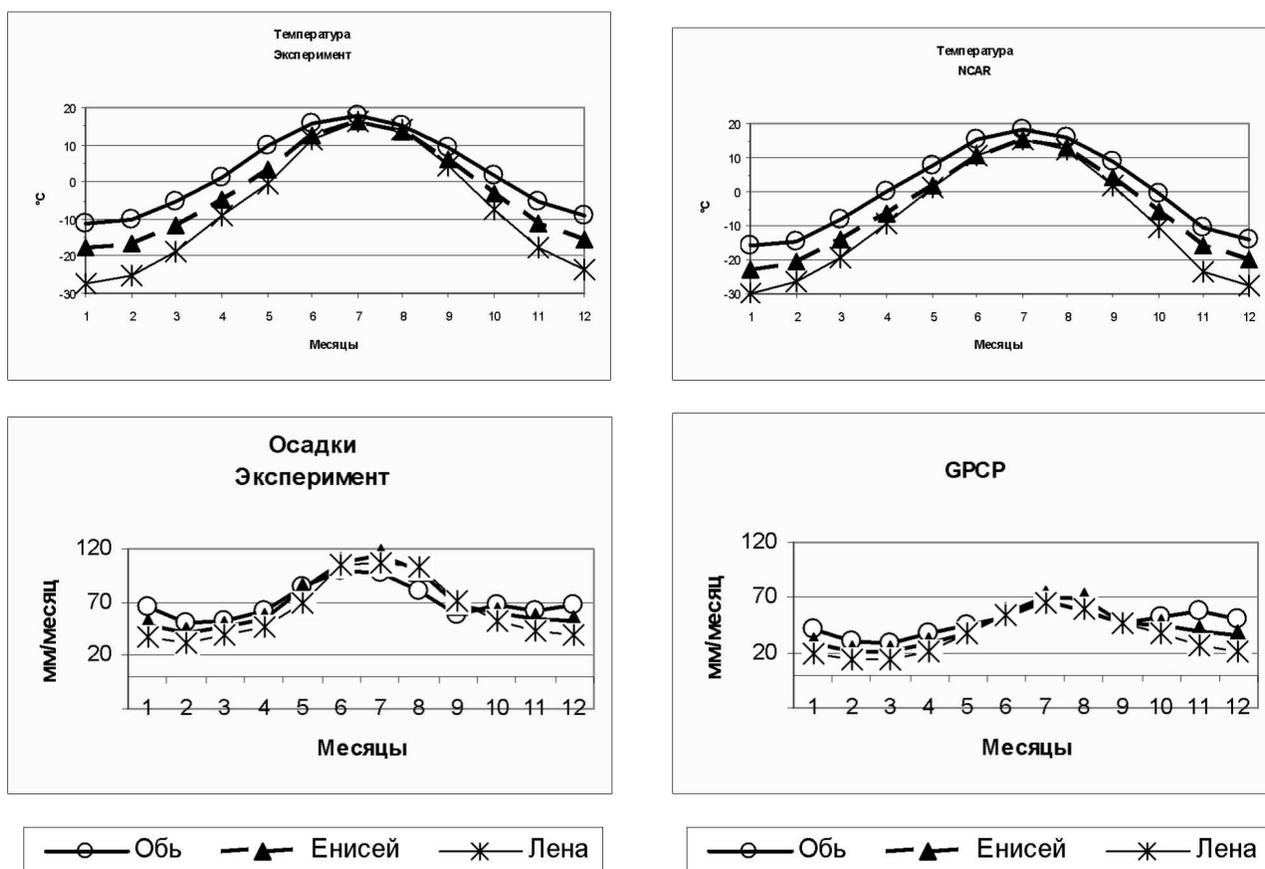


Рис. 2. Средние за 20 лет годовые изменения температуры и осадков для трех бассейнов сибирских рек по данным эталонов и результатам численных экспериментов.

личины накопленной массы снега для бассейна Оби и Енисея в эксперименте с моделью Гидрометцентра ближе к величинам из реанализа NCAR\NCEP, а в экспериментах с моделями ГГО и ИВМ эти величины несколько выше и близки к данным реанализа ERA. Для бассейна р. Лены площадь снега в эксперименте с моделью ИВМ по сравнению с остальными моделями и данными реанализов завышена. Модельные расчеты ГГО близки к данным реанализа ERA, а результаты модели ГМЦ практически совпадают с данными реанализа NCAR\NCEP.

## 2.2. Анализ процесса таяния снежного покрова в бассейнах великих сибирских рек

Рассмотрим весьма важный как для анализа качества моделирования гидрологии региона, так и для решения прогностических задач режим таяния снега. Судя по данным рис. 2, весна в Западной Сибири наступает раньше и температуры воздуха над бассейном р. Оби заметно выше в весенние месяцы по сравнению с другими бассейнами. Сезон таяния снега может начинаться в середине — конце марта. В водосборе р. Лены снег сходит на месяц позже. Скорость таяния снежного покрова прямо пропорциональна скорости роста стока рек. Максимум значений этих скоростей для Оби приходится на конец апреля, а для Лены — на май. Скорость таяния снега в бассейне Енисея растет постепенно в течение первых двух календарных весенних месяцев. Ниже приводятся результаты сравнения таяния снега в реанализах.

Время, за которое протекает таяние снежного покрова, зависит как от интенсивности потепления в регионах, так и от запасов снега, накопленных за зиму. Судя по средним данным, приведенным на рис. 2, над Западной Сибирью наблюдаются более высокие зимние осадки, чем над Восточной. По результатам многолетних наблюдений максимальная толщина снега в бассейне р. Оби в конце зимы составляет 39 см, а в бассейне Лены — 32 см [8]. Необходимо отметить, что, судя по рис. 1, в среднем таяние во всех бассейнах заканчивается почти одновременно к июлю.

Отметим также, что время таяния снега для бассейна р. Оби практически совпало в обоих реанализах. Темп таяния снега здесь наиболее близок к темпу таяния в реанализах. Он вполне удачно описан в эксперименте с моделью ГМЦ. В эксперименте с моделью ИВМ таяние начинается на месяц-полтора раньше и протекает медленнее. В эксперименте с моделью ГГО таяние начинается позже остальных данных и протекает быстрее. Заканчивается таяние с месячной точностью практически одновременно для всех моделей.

Для бассейнов Енисея и Лены по данным реанализа ERA накоплено несколько больше снега, но таяние начинается и заканчивается практически одновременно. Очень близкий к данным реанализов характер таяния снега отразился в эксперименте с моделью ГМЦ. И в бассейне Енисея, и в бассейне Лены таяние снега в эксперименте ГГО задержалось практически на месяц и закончилось только в июле. Темп таяния снега в модели ИВМ ближе к данным реанализов, оно протекает более интенсивно, хотя заканчивается, как и в остальных моделях, в июне.

Наибольшие отличия от реанализов наблюдаются в результатах экспериментов с моделью ГГО. Мы приводим качественное сравнение таяния снега в моделях с изменением стока, так как сток, и особенно средний многолетний сток, как уже упоминалось выше, является наиболее надежно измеряемой интегральной гидрологической характеристикой бассейна, более точной, чем средние по бассейнам характеристики снежного покрова или осадки.

### 3. Сравнение данных снегомерных наблюдений в бассейнах великих рек Сибири с данными реанализов

Кроме анализа воспроизведения моделями средних за 20 лет режимов становления и таяния снега нами предпринята попытка оценки описания аномалий снежного покрова. Было проведено сравнение данных по водному эквиваленту снежного покрова и результатов снегомерных измерений по территории России. Методика сравнения была следующая. Из 1300 были отобраны 707 станций с точки зрения длин ряда, полноты данных, отсутствия выбросов, а также распределения по бассейнам выбранных рек. В рядах станционных данных убраны интервалы времени, в которых толщина снега меньше или равна нулю, и получен сквозной ряд данных. По каждой станции за весь имеющийся интервал рассчитывались месячные нормы. В каждой станции получены аномалии как отклонения от собственных норм. Из данных реанализов выбирались ближайшие к каждой станции узлы, для каждого выбранного узла, как и для станций, рассчитывались месячные нормы по точно тому же интервалу времени и аномалии.

Распределение станций по градациям коэффициентов корреляций между данными станционных наблюдений и реанализами

Градация коэффициентов корреляции	ERA		NCAR 2		NCAR 1	
	%	Количество станций	%	Количество станций	%	Количество станций
– 1...0.2	10.2	72	41.7	294	68.1	483
0.2...0.5	44	310	41.0	289	29.7	209
0.5...1	45.8	323	17.3	122	1.6	11

Характеристиками сравнения рядов являлись коэффициенты корреляции полученных временных рядов аномалий. Результаты сравнения сведены в таблицу. Видно, что наиболее высокий процент высоких величин корреляций между данными снегомерной съемки и реанализами имеет место для европейского реанализа (45.8%), кроме того, видно, что во второй версии реанализа NCAR в десять раз увеличилась доля рядов, имеющих высокую корреляцию, но все же она осталась ниже, чем в европейском.

## Выводы

В работе анализируются характеристики снежного покрова, полученные в реанализах NCAR/NCEP и ERA, а также в численных экспериментах с моделями ОЦА типа AMIP-2 Гидрометцентра России, ИВМ РАН и ГГО им. А.И. Воейкова.

Показано, что средние за 20 лет эксперимента изменения площади снежного покрова в регионах великих сибирских рек Оби, Енисея и Лены воспроизводятся всеми моделями. В осенне-зимний период формирования снежного покрова результаты всех моделей близки друг к другу, а в весенний период активного таяния снега результаты в эксперименте с моделью ГМЦ ближе к эталону, чем в остальных российских моделях.

Сравнение корреляции временных рядов аномалий снегомерных съемок и данных реанализов показало, что наиболее высокая корреляция у рядов аномалий с данными Европейского центра среднесрочных прогнозов, но и она не очень высока. После сравнения аномалий осредненных данных снегомерной съемки в бассейнах рек с данными реанализов

и результатами численных экспериментов показано также, что в настоящее время мы не имеем достаточно достоверных эталонов для анализа аномалий характеристик снежного покрова в бассейнах сибирских рек.

Авторы работы выражают признательность сотруднику ИВМ РАН Е.В. Володину и сотруднику ГГО им. А.И. Воейкова В.И. Катцову за предоставленные ряды по водному эквиваленту снега в экспериментах АМIP-2.

## Список литературы

- [1] КАТЦОВ В.М., МЕЛЕШКО В.П., ГАВРИЛИНА В.М. и др. Пресноводный бюджет полярных регионов по оценкам моделей общей циркуляции атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34, № 4. С. 479–489.
- [2] РУБИНШТЕЙН К.Г., ГРОМОВ С.С. Воспроизведение характеристик снежного покрова в моделях общей циркуляции атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. (Принята к печати).
- [3] BARNETT T.P., DUMENIL L., SCHLESE U. ET AL. The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations // J. of Atm. Sci. 1989. Vol. 46, N 5. P. 661–685.
- [4] FOSTER J., LISTON G., KOSTER R. ET AL. Snow cover and snow mass intercomparisons of general circulation models and remotely sensed datasets // J. Clim. 1996. N 9. P. 409–426.
- [5] FREI A., ROBINSON D. Evaluation of snow extent and its variability in the Atmospheric Model Intercomparison Project // J. of Geoph. Res. 1998. Vol. 103, N D8. P. 8859–8871.
- [6] FREI A., MILLER J.A., ROBINSON D. Improved simulation of snow extent in the second phase of atmospheric model intercomparison project (AMIP-2) // J. of Geoph. Res. 2003. Vol. 108, N D12. P. 10–17.
- [7] KALNAY E., KANAMITSU M., KISTLER R. ET AL. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. Vol. 77(3). P. 437–470.
- [8] YANG D., ROBINSON D., ZHAO Y. ET AL. Streamflow response to seasonal snow cover extent changes in large Siberian watersheds // J. of Geoph. Res. 2003. Vol. 108, N D18. P. 4578–4601.
- [9] GIBSON R., KALLBERG P., UPPALA S. ET AL. ERA Description, ECMWF Reanalysis Project Report Series, Vol. 1. Reading: Europ. Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 1997. 72 p.
- [10] ДИАНСКИЙ Н.А., ВОЛОДИН Е.М. Воспроизведение современного климата с помощью модели общей циркуляции атмосферы и океана // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38, № 6. С. 824–840.

*Поступила в редакцию 2 июня 2005 г.*