

# Реализация и тестирование на данных реанализа метода расчета интенсивности осадков на основе параметризации микрофизических процессов\*

И.В. АКИМОВ

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ*

Р.Ю. ИГНАТОВ

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ*

27 декабря 2003 г.

Проведено тестирование метода расчета интенсивности осадков, основанного на параметризации микрофизических процессов в облаках капельного и смешанного фазового состояния. Расчет осадков проводился на основе пространственного распределения температуры и влажности в атмосфере, взятых по данным реанализа. Величины осадков сравнивались с осадками GPCP (Global Precipitation Climatology Project) и осадками взятыми по данным реанализа NCAR/NCEP. В ходе тестирования анализировались зонально-осредненное распределение осадков, годовой ход осадков над северным полушарием и годовой ход осадков над отдельными регионами. Результаты расчетов показали, что метод с хорошей степенью точности воспроизводит сезонные и годовые особенности распределения осадков.

Точность описания осадков является важным аспектом, в прогностических и климатических моделях. От правильности физического описания процесса образования осадков зависит как перераспределение влаги между слоями в атмосфере, так и величина водного баланса атмосферы и подстилающей поверхности. Поэтому, разработка метода, который с достаточной степенью точности отражает физику процесса осадкообразования, является важной проблемой при моделировании атмосферных процессов. Исторически, первые методы расчета осадков базировались на анализе полей температуры и влажности [1]. Суть этих методов состояла в расчете осадков по превышению влажности над насыщающей величиной. Однако, учет физики процесса осадкообразования в рамках таких методов не представляется возможным, прежде всего в виду неправильной интерпретации образования осадков, как мгновенного сброса всей сконденсировавшейся влаги на подстилающую поверхность. Начиная с работ [2–4], процесс образования осадков стал учитываться более детально. Однако, схемы параметризации, изложенные в этих работах, требуют введения дополнительных уравнений для влагосодержания и других характеристик облачности. Такой подход не всегда является удобным, так как он приводит к увеличению системы уравнений модели, что в свою очередь существенно увеличивает время счета. Отсутствие начальных данных по водосодержанию облаков приводит к тому, что модель, включающая дополнительные уравнения для облачной воды и льда вынуждена стартовать с нулевых

---

\*Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, гранты № 01-05-65493, № 02-05-06100, № 03-05-64312

исходных данных по этим величинам. Такой подход приводит к достаточно большому времени согласования характеристик влажности с динамикой модели, так как источники и стоки водяного пара в этом случае определяются неточно. Это в свою очередь негативно сказывается на точности расчета количества осадков на коротких заблаговременностях.

В данной работе сделана попытка реализовать метод расчета интенсивности осадков, который детально учитывает физику процесса осадкообразования и в то же время не требует введения дополнительных уравнений в модель. Таким образом, основываясь на вертикальном распределении температуры и влажности, необходимо определить границы и протяженность облачных слоев, их влагосодержание и средний размер облачных частиц. Для пространственных масштабов порядка 50–300 км такая задача может быть реализована путем параметрического описания слоистообразной и конвективной облачности в рамках шага сетки модели.

Для слоистообразной облачности информация о границах и протяженности облачного слоя может быть получена на основе анализа вертикального распределения влажности. Слой в атмосфере будет считаться облачным при выполнении условия, согласно работе [1]:

$$S \geq S_{\text{кр}}, \quad (1)$$

где  $S$  — значение относительной влажности в слое,  $S_{\text{кр}}$  — критическое значение относительной влажности для различных высот в атмосфере:

$$S_{\text{кр}} = 0,8 \text{ при } p = 950 \div 800 \text{ гПа (облака нижнего яруса),}$$

$$S_{\text{кр}} = 0,7 \text{ при } p = 800 \div 500 \text{ гПа (облака среднего яруса),}$$

$$S_{\text{кр}} = 0,6 \text{ при } p = 500 \div 300 \text{ гПа (облака верхнего яруса).}$$

После определения пространственной протяженности и границ облачного слоя необходимо рассчитать значения водности в этом слое  $\delta$  (кг/м<sup>3</sup>). Величина  $\delta$  может быть определена по значениям влажности и температуры используя эмпирические соотношения, полученные в [5] путём обобщения данных самолетного зондирования облаков.

Величину среднего размера облачных частиц можно рассчитать по величинам водности, пользуясь следующей эмпирической зависимостью из работы [6]:

$$r_1 = a \cdot \delta + b, \quad (2)$$

где  $a = 11,0$  и  $b = 4,0$  — постоянные.

Критерием наличия конвективной неустойчивости в атмосфере можно считать выполнение неравенства из работы [7]  $\gamma > \gamma_a$ , где  $\gamma$  (К/м) — градиент температуры в приземном слое атмосферы,  $\gamma_a = 0.0098$  К/м — сухоадиабатический градиент.

Уровень конденсации (нижняя граница конвективного облака)  $p_{\text{к}}$  определяется как уровень, для которого справедливо следующее равенство:

$$s(p = p_{\text{к}}) = s_m(T_i) \quad (3)$$

где:

$$T_i(p) = T(p_0) - \gamma_a \frac{p_0 - p}{\rho g}. \quad (4)$$

Здесь  $T(p_0)$  — температура в приземном слое атмосферы,  $p_0$  — приземное давление,  $g$  — ускорение свободного падения. В случае расчета температуры  $T_i$  по формуле (4) для слоев в атмосфере, находящихся выше уровня конденсации, величина сухоадиабатического градиента  $\gamma_a$  должна быть заменена величиной влажноадиабатического градиента

$\gamma_{\text{ва}}$ .

Уровень конвективного подъема (верхняя граница конвективного облака)  $p_{\Pi}$  может быть определен как уровень, для которого обращается в ноль следующий интеграл:

$$\int_{p_0}^{p_{\Pi}} \frac{T_i(p) - T(p)}{T(p)} dp = 0 \quad (5)$$

Водность, образовавшаяся при конвективном подъеме в слое толщиной  $\Delta p$ , рассчитывается согласно следующей формуле из [7]:

$$\delta = s(p) - s_m(p + \Delta p) - a \frac{\Delta p}{\rho g}, \quad (6)$$

где  $a = 10^{-5} \div 10^{-3} \text{ м}^{-1}$  — показатель вовлечения.

Основываясь на величинах водности и среднего размера облачных частиц как на исходных для данного облачного слоя при расчете интенсивности осадков может быть применен метод параметризации микрофизических процессов, изложенный в [8]. Метод позволяет рассчитывать интенсивность осадков, выпадающих из облаков капельного и смешанного фазового состояния. При расчете интенсивности осадков учитываются процессы усиления осадков в нижележащих облачных слоях, испарения и таяния частиц осадков. Основой метода является учет изменения функции распределения частиц облака и частиц осадков. Такой подход, в отличие от методов, изложенных в работах [2–4], позволяет более реалистично воспроизвести физику процесса осадкообразования, в частности, определить величину критической водности в зависимости от скорости роста облачных частиц, учесть изменение среднего размера частиц облака и частиц осадков.

Таким образом, был разработан метод, позволяющий с помощью эмпирических соотношений и параметров детально учесть физику процесса осадкообразования, основываясь на вертикальном распределении температуры и влажности. Для того, что бы понять точность представления величин осадков с помощью данного метода, было проведено тестирование рассчитанных величин осадков. Метод был реализован на ЭВМ в виде программы расчета осадков на языке Fortran-90. Диагностически метод был испытан на исходных полях температуры и влажности, взятых из реанализа NCAR/NCEP [9] за 1996 г. Поля представлялись на стандартных изобарических поверхностях 1000, 925, 700, 850, 500, 400 и 300 гПа. Рассчитанные величины осадков были сравнены с эталонными величинами, в качестве которых были выбраны осадки GPCP (Global Precipitation Climatology Project) [10] и осадки взятые из реанализа NCAR/NCEP.

На рис. 1а представлена среднегодовая зонально-осредненная интенсивность осадков над северным полушарием. Из рисунка видно, что ход рассчитанных величин осадков довольно хорошо согласуется с эталонами, однако, существуют заметные отклонения расчетных осадков от эталонов, в частности в районе 40 с.ш. и в полярных широтах. Что бы объяснить причину этого рассогласования, было отдельно исследовано зональное распределение осадков, полученное путем осреднения результатов расчетов и эталонов над сушей северного полушария. Результаты представлены на рис. 1б. Из рисунка видно, что в этом случае рассчитанные величины осадков значительно ближе к эталонным, их ход практически совпадает. Причина этого может быть связана с тем, что осадки над океанами получены с использованием только косвенных методик (численное моделирование и спутниковые наблюдения за уходящей длинноволновой радиацией). Точность этих методов значительно ниже точности наземной осадкомерной сети. Поэтому исключение

из сравнения данных обладающих меньшей степенью достоверности привело к лучшему совпадению результатов расчетов с эталонами.

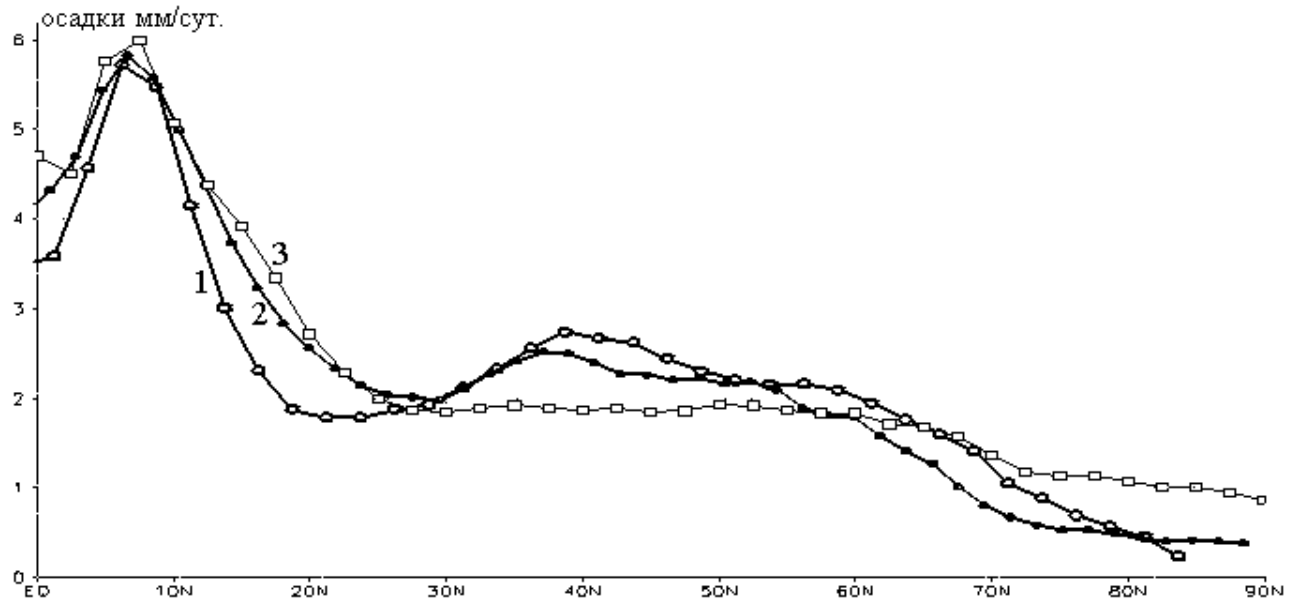
На рис. 2 представлен годовой ход интенсивности осадков над северным полушарием (рис. 2а) и над сушей северного полушария (рис. 2б). Из рисунков видно, что результаты расчетов хорошо укладываются в интервал между двумя эталонами. Принимая разброс между эталонами за доверительный интервал, можно сделать вывод, что метод рассчитывает осадки с допустимой погрешностью. Так, коэффициент корреляции между временными ходами результатов расчетов и данными ГРСР для северного полушария (рис. 2а) составляет 0.88, коэффициент корреляции между данными расчетов и данными реанализа составляет 0.96. Для суши северного полушария (рис. 2б) эти величины коэффициента корреляции равны 0.93 и 0.95 соответственно.

Из рис. 1 и 2 видно, что метод с достаточной степенью точности отражает глобальные особенности распределения осадков. Это касается как зонально-осредненных величин, так и годового хода интенсивности осадков. Кроме глобальных характеристик, представляет интерес исследование региональных особенностей осадков.

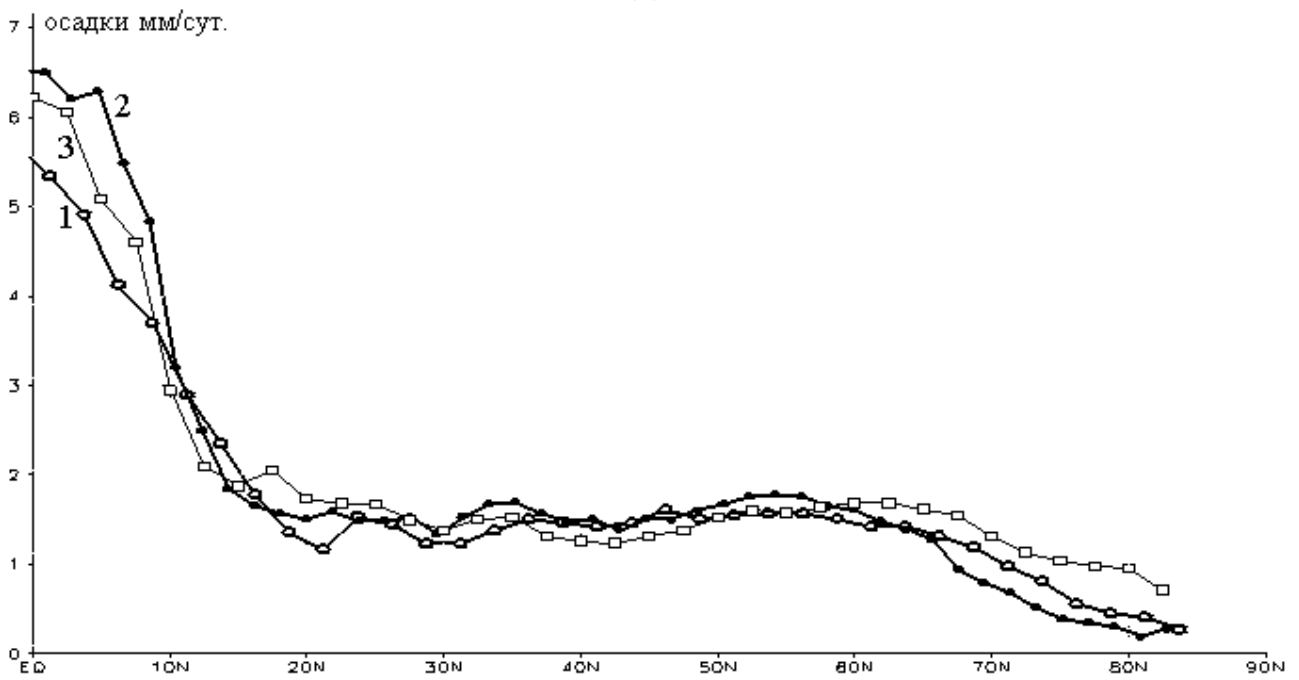
На рис. 3 представлен годовой ход осадков, полученный для различных регионов северного полушария. Рис. 3а показывает ход осадков над европейской территорией России (ЕТР). Из рисунка видно, что метод реалистично отразил основные максимумы и минимумы хода осадков над ЕТР, хотя некоторые максимумы, например в начале года, были выражены слабее. Коэффициент корреляции между временными ходами результатов расчета и данными ГРСР составил 0.71, а с данными реанализа — 0.81. Коэффициент корреляции между осадками ГРСР и осадками реанализа — 0.57. На рис. 3б представлен годовой ход осадков над Британскими островами. Видно, что рассчитанные осадки в теплый период года близки к эталонным, а в холодный сезон — занижены. Коэффициенты корреляции между данными расчетов и данными ГРСР и реанализа равны 0.59 и 0.54 соответственно. Коэффициент корреляции между эталонами составляет 0.72. Ход осадков над Скандинавским полуостровом (рис. 3в) более близок к эталонам, но и здесь прослеживается тенденция занижения осадков в холодный сезон. Здесь коэффициенты корреляции результатов расчета с данными ГРСР и реанализа осадков равны 0.63 и 0.82. Коэффициент корреляции между эталонами — 0.59. Ход осадков над центральным Средиземноморьем (рис. 3г) позволяет сделать вывод, что метод хорошо отразил минимум осадков, наблюдающийся в летний сезон, при этом зимние осадки так же оказались занижены в сравнении с эталонами. Коэффициенты корреляции между результатами расчетов и эталонами составили 0.69 и 0.75 для данных ГРСР и реанализа соответственно. Коэффициент корреляции между эталонами — 0.69.

Таким образом, анализ данных, представленных на рис. 3 показывает, что коэффициент корреляции данных расчета осадков с осадками ГРСР и осадками реанализа сравним со значениями коэффициента корреляции между эталонами, а иногда и превосходит эти значения. Это свидетельствует о том, что точность расчета осадков по тестируемому методу сравнима с точностью расчета осадков по эталонам. Количество осадков над регионами также хорошо согласуется с эталонными величинами, имея, однако, тенденцию к занижению в холодный период. Одной из возможных причин занижения рассчитанных осадков в холодный сезон является тот факт, что над Европой в летнее время осадки формируются в слое 950 — 400 гПа, тогда как в холодный период этот слой сокращается до 950 — 850 гПа. Возможно, выбранного вертикального разрешения температуры и влажности не хватало, чтобы детально отразить процесс образования осадков в этот период.

Таким образом, проведенный анализ показал, что метод с хорошей степенью точности

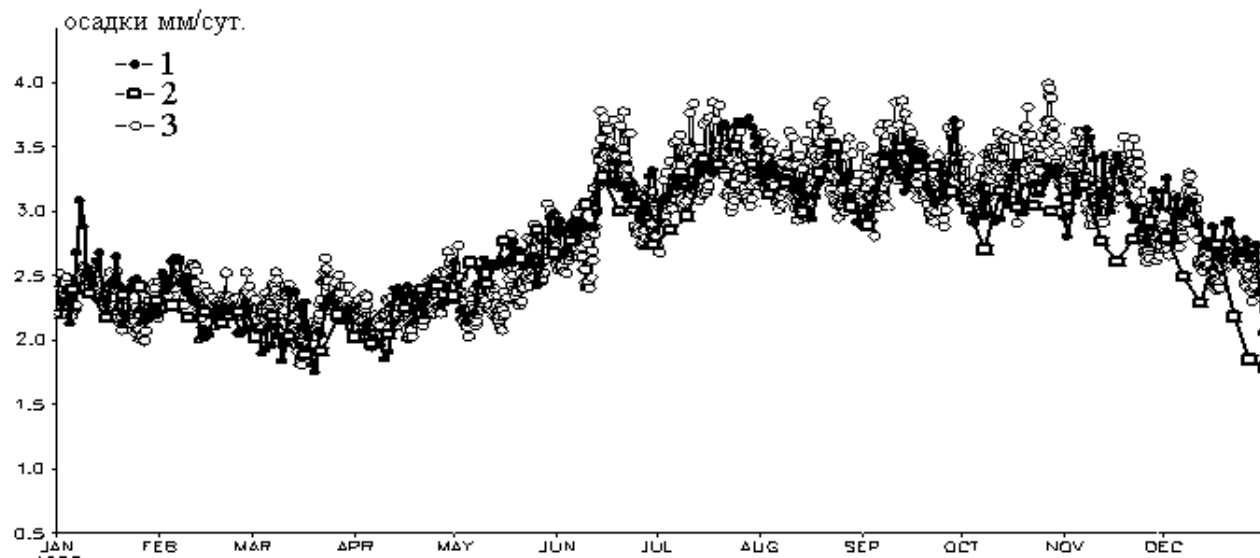


(a)

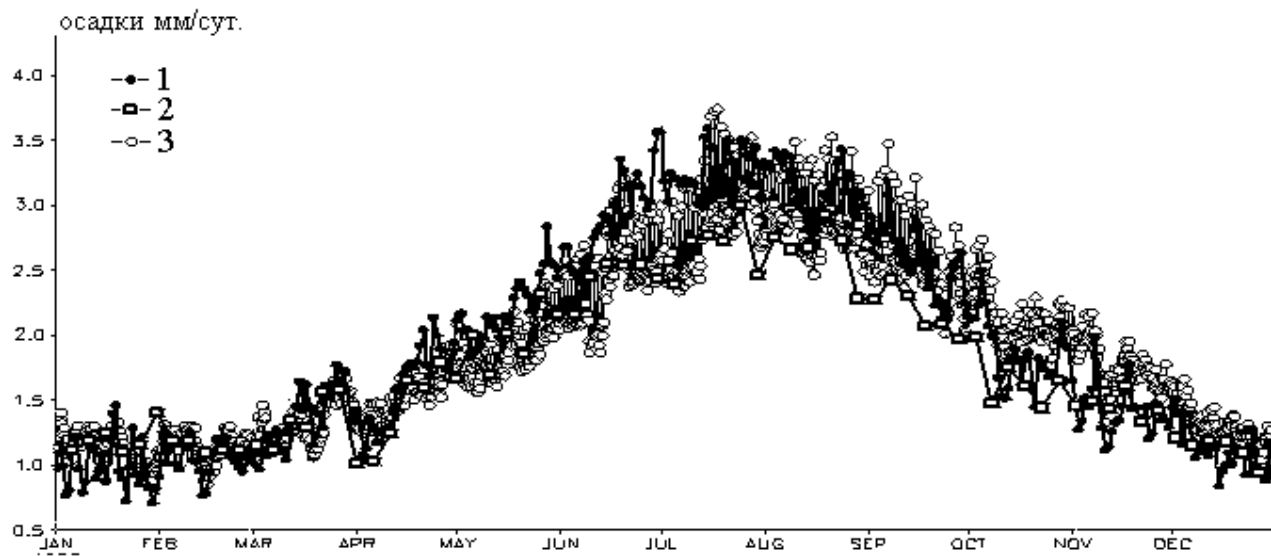


(б)

Рис. 1. Среднегодовая зонально-средненная интенсивность осадков: а) — над северным полушарием б) — над сушей северного полушария. 1) — по данным GPCP; 2) — по данным реанализа; 3) — результаты расчетов.

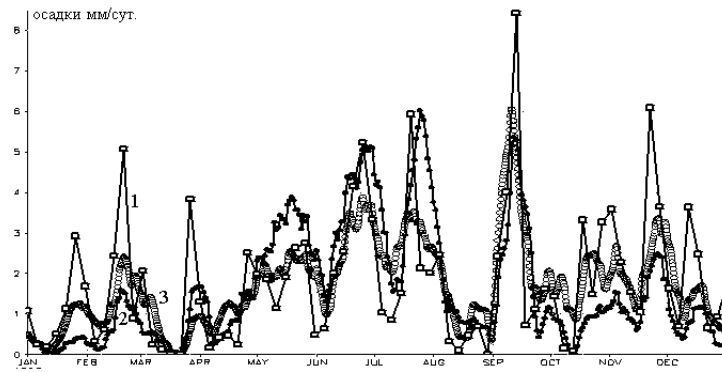


(a)

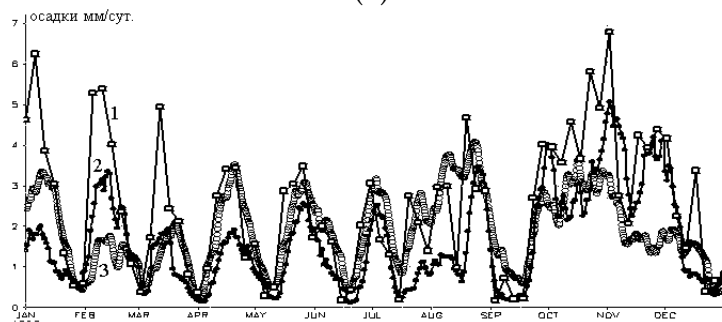


(б)

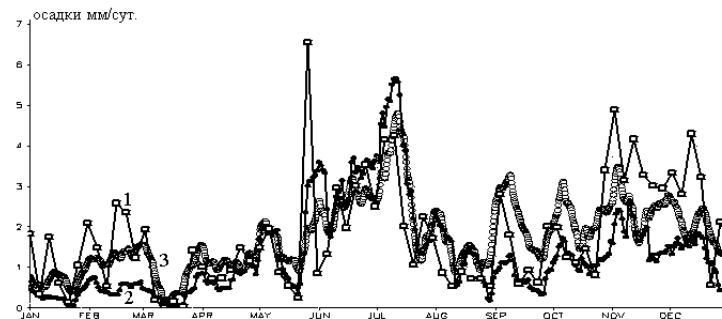
Рис. 2. Годовой ход интенсивности осадков: а) — над северным полушарием б) — над суши северного полушария. 1) — по данным ГРСР; 2) — по данным реанализа; 3) — результаты расчетов.



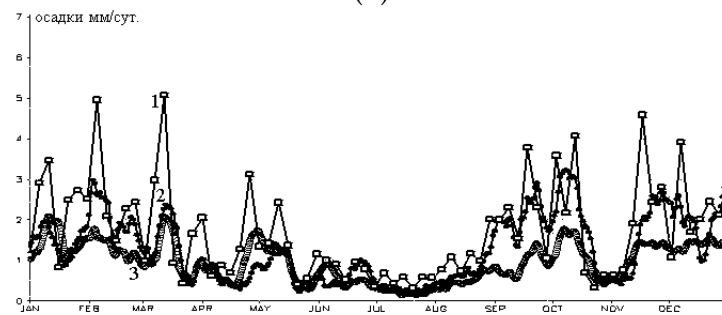
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 3. Годовой ход интенсивности осадков над различными регионами: а) - европейская территория России; б) - Британские острова; в) - Скандинавский полуостров; г) - центральное Средиземноморье. 1) — по данным GPCP; 2) — по данным реанализа; 3) — результаты расчетов.

позволяет рассчитать сезонный и годовой ход осадков над различными регионами суши северного полушария.

Учитывая положительный результат тестирования, метод был включен в модель общей циркуляции атмосферы Гидрометцентра России [11]. В модели была произведена замена блока расчета осадков, реализованного, согласно работе [2], на блок расчета осадков, реализованный на основе тестируемого метода. С новой версией модели была проведена серия численных экспериментов. Величины осадков сравнивались с осадками ГПСР. Расчет проводился для различных широтных зон, для каждого из полушарий и для всего Земного шара. Учитывая большую степень достоверности осадков ГПСР над сушей, океанические территории были исключены из анализа. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Из таблицы видно, что использование нового метода расчета осадков в модели общей циркуляции атмосферы привело к росту коэффициентов корреляции между модельными и эталонными осадками во всех регионах, кроме высоких широт обоих полушарий, где коэффициенты корреляции лишь немногим меньше, чем в версии модели со старой параметризацией (исходная версия).

Таким образом, результаты тестирования метода и предварительные результаты экспериментов по включению нового метода в модель показали, что использование параметризации микрофизических процессов приводит к улучшению описания осадков в модели.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между временными ходами модельных осадков (1980-1988 гг.) и осадков ГПСР над сушей (среднемесячные величины).

| Территория                           | Исходная версия модели | Новая версия модели |
|--------------------------------------|------------------------|---------------------|
| Северное полушарие                   | 0.91                   | 0.92                |
| Южное Полушарие                      | 0.93                   | 0.94                |
| Тропики северного полушария          | 0.96                   | 0.96                |
| Тропики южного полушария             | 0.92                   | 0.93                |
| Умеренные широты северного полушария | 0.39                   | 0.43                |
| Умеренные широты южного полушария    | -0.02                  | 0.16                |
| Высокие широты северного полушария   | 0.75                   | 0.71                |
| Высокие широты южного полушария      | 0.62                   | 0.60                |

Авторы выражают свою благодарность К.Г. Рубинштейну за помощь и полезные консультации при проведении исследования и в процессе работы над публикацией.

## Список литературы

- [1] Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Хворостьянов В.И. Облака и климат // Л.: Гидрометиздат. 1986. 512 с.



- [2] KESSLER E. On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations // Meteor. Monogr. 1969. V. 10. 84 p.
- [3] RUTLEDGE S.A., HOBBS P.V. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in mid-latitude cyclones VIII: A model for the "seeder-feeder" process in warm-frontal rainbands // J. Atm. Sci. 1983. V. 40, P. 1185–1206.
- [4] SUNDQVIST H. Inclusion of ice phase of hydrometeors in cloud parameterization for mesoscale and large-scale models // Beitr. Phys. Atmosph. 1993. N 66. P. 137–147.
- [5] Облака и облачная атмосфера. Справочник Под. ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана // Л. Гидрометеоиздат. 1989. 647 с.
- [6] JONSON D.W. Parameterization of the cloud topped boundary layer: Aircraft measurements. Proceedings of the workshop held at ECMWF on parameterization of the cloud topped boundary layer. 1993. Reading, UK. P. 5–35
- [7] МАТВЕЕВ Л.Т. Физика атмосферы // СПб.: Гидрометеоиздат. 2000. 778 с.
- [8] АКИМОВ И.В. Метод расчета интенсивности осадков на основе параметризации микрофизических процессов в облаках капельного и смешанного фазового состояния // Известия АН, серия ФАО. Т. 39. № 4. 2003. С. 458–465.
- [9] KALNAY E, KANAMITSU M., R. KISTLER, W. COLLINS, D. DEAVEN, L. GANDIN, M. IREDELL, S. SAHA, G. WHITE, J. WOOLLEN, Y. ZHU, A. LEETMAA, R. REYNOLDS, M. CHELLIAH, W. EBISUZAKI, W. HIGGINS, J. JANOWIAK, K. C. MO, C. ROPELEWSKI, J. WANG, ROY JENNE, DENNIS JOSEPH. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. N 77(3). 1996. PP. 437–484.
- [10] The Global Precipitation Climatology Project — Implementation and Data Management Plan // WMO/TD. N. 367.
- [11] РУБИНШТЕЙН К.Г., ЕГОРОВА Е.Н. Оценка воспроизведения годового хода характеристик атмосферы и суши моделью общей циркуляции атмосферы Гидрометцентра России // Труды Гидрометцентра России. Вып. 333. 2000. С. 92–140.