

УДК 551.513: 551.576.7

## ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКАЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ОБЛАЧНОСТИ В МОДЕЛИ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ

© 2019 г. В. Я. Галин\*, В. П. Дымников\*\*

*Институт вычислительной математики РАН им. Г.И. Марчука*

*119333, Москва, ул. Губкина, 8*

*E-mail: \*venergalin@yandex.ru, \*\*dymnikov.valentin@yandex.ru*

Поступила в редакцию 24.04.2019 г.

Принята к печати 29.05.2019 г.

В работе формулируется метод динамико-стохастической параметризации балла неконвективной облачности в модели общей циркуляции атмосферы. Предложенный алгоритм исследуется на основе модели общей циркуляции атмосферы с заданной температурой поверхности океанов. Результаты расчетов сравниваются с данными спутниковых наблюдений и с результатами расчетов балла облачности, выполненными с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана высокого разрешения. Приведенные результаты показывают несомненную перспективность данного подхода.

**Ключевые слова:** облака, численное моделирование атмосферных процессов, динамико-стохастические модели.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0002-35155553-8>

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается большой интерес к построению динамико-стохастических моделей климата, в основе которых лежат модели общей циркуляции атмосферы и океана. Впервые динамико-стохастические модели были предложены Хассельманом [1]. Однако идеи Хассельмана относились скорее к малопараметрическим моделям, а не к моделям общей циркуляции. Динамико-стохастическая модель низкочастотной изменчивости атмосферной циркуляции была предложена в работе [2]. Весьма детальный анализ стохастической динамики многих природных процессов сделан в работе [3]. Достаточно полный обзор зарубежных работ этого направления стохастизации динамических моделей климата можно найти в [4].

Чем обусловлен современный интерес к построению динамико-стохастических моделей? Прежде всего, стохастическая параметризация процессов подсеточных масштабов может быть использована как средство параметризации процессов, которые нам до конца неизвестны или для которых мы в принципе не можем построить процесс замыкания. Во-вторых, процедура стохастизации может заменить процедуру осреднения по ансамблю моделей, ибо каждая

реализация в этом случае может рассматриваться как самостоятельная модель. В этом случае эта процедура заменяет необходимость создания ансамбля независимых моделей климата, которая лежит сейчас в основе всех международных программ типа СМIP [5]. Важным результатом этих программ было установление факта, что осреднение по ансамблю моделей дает результат более близкий к реальности, чем отдельная (даже самая лучшая) модель. Далее, центральным вопросом современной теории климата является вопрос о чувствительности климата к внешним воздействиям, в частности, к малым внешним воздействиям [6]. В практике численного моделирования этот вопрос является критическим. С точки зрения математической теории климата, исследование чувствительности климата сводится к исследованию устойчивости меры на аттракторе системы, а в случае малых возмущений — к ее гладкости, т.е. к возможности использования процедуры линеаризации. Эта проблема удивительным образом решается с помощью стохастической регуляризации системы, т.е. добавлением в систему малого случайного форсинга [7]. Такая добавка дает возможность использования диссипационно-флуктуационных соотношений для построения оператора отклика системы на малые внешние воздействия [8].

Наличие устойчивой эргодической стационарной меры при использовании стохастической регуляризации было строго доказано для двумерных уравнений несжимаемой вязкой жидкости [9] и двуслойной квазигеострофической модели атмосферы [10, 11].

В настоящей работе мы формулируем и исследуем динамико-стохастическую параметризацию одного из процессов подсеточного масштаба — формирование балла неконвективной облачности, играющего фундаментальную роль в формировании радиационных притоков тепла. Само представление о формировании балла неконвективной облачности как реализации случайного процесса кажется вполне естественным. Можно, например, предположить, что случайным является распределение водяного пара внутри ячейки интегрирования или распределения вертикальных движений. Предположения о различных родах распределения метеоэлементов внутри ячейки интегрирования было сделано в работах [12, 13, 15], в которых было получено обоснование графиков Смагоринского [14] для малых величин балла облаков: усредненной линейной связи балла неконвективной облачности со средней относительной влажностью. В отличие от цитируемых выше работ в данной работе мы исследуем параметризацию балла неконвективной облачности, центральной идеей которой является прямое моделирование случайного распределения характеристик полей влажности внутри ячейки интегрирования модели общей циркуляции атмосферы. Ясно, что в общем случае это распределение может зависеть от множества параметров (особенно для полей влажности в нижней тропосфере).

Вопросы, которые нам представляются весьма интересными, заключаются, прежде всего, в определении минимальных требований к формулировке этих распределений и в определении «степени эргодичности», о которых мы упомянули выше.

Эти проблемы исследуются с помощью модели общей циркуляции атмосферы, подробно описанной в [16, 17].

### ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКАЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НЕКОНВЕКТИВНОЙ ОБЛАЧНОСТИ

Рассмотрим ячейку интегрирования, горизонтальную площадь которой нормируем на единицу. Будем предполагать, что все процессы, происходящие в ячейке интегрирования одно-

родны по вертикали. Будем также считать, что горизонтальное распределение полей влажности в ячейке является случайной величиной, определяемой, например, случайным распределением вертикальных токов или флуктуациями вертикального перемешивания. Определим среднюю относительную влажность в ячейке как

$$\bar{r} = \int_S \frac{q}{q_m} dS,$$

где  $q$  — распределение поля удельной влажности, а  $q_m$  — максимальная удельная влажность, которая есть функция температуры и давления. Поскольку в облаках можно считать, что  $q = q_m$ , то

$$\bar{r} = n + \int_{1-n} \frac{q}{q_m} dS,$$

где  $n$  — балл облачности (площадь, занятая облаками при  $S = 1$ ). Эту формулу можно переписать в виде

$$\bar{r} = n + \left( \frac{q}{q_m} \right)^* (1 - n), \quad (1)$$

где  $\left( \frac{q}{q_m} \right)^*$  — некоторое значение относительной влажности, вычисленное по теореме о среднем, и зависящее от распределения  $q$  и  $q_m$  в ячейке. Наше предложение состоит в том, чтобы  $\left( \frac{q}{q_m} \right)^* \equiv \alpha$  считать случайной величиной. Главная проблема теперь заключается в том, чтобы определить диапазон изменения этой случайной величины, поскольку мы хотим «обратить» зависимость (1), т.е. найти однозначную зависимость  $n = f(r)$ . Поскольку  $n \in (0, 1)$ , то из (1) следует, что  $n \leq \bar{r}$ . Далее, перепишем (1) в виде:

$$n = \frac{\bar{r} - \alpha}{1 - \alpha}. \quad (2)$$

Так как  $1 - \alpha > 0$ , то из условия  $0 \leq n \leq 1$  следует, что  $\alpha \leq \bar{r}$ . В (2) также выполняется асимптотическое соотношение  $n \rightarrow 1$  при  $\bar{r} \rightarrow 1$ .

Таким образом, область значений случайной величины  $\alpha$  должна принадлежать интервалу  $(0, \bar{r})$ :  $\alpha \in (0, \bar{r})$ .

Из (1) несложно вывести формулы Смагоринского [14]. Если усреднить (1) по ансамблю случайной величины  $\alpha$ , то получим

$$\langle n \rangle = \frac{\langle \bar{r} \rangle}{1 - \langle \alpha \rangle} - \frac{\langle \alpha \rangle - \langle \alpha' n' \rangle}{1 - \langle \alpha \rangle}, \quad (3)$$

где  $\alpha'$ ,  $n'$  — отклонения  $\alpha$  и  $n$  от среднего по ансамблю. Фактически, если считать  $\langle \alpha \rangle$  и  $\langle \alpha' n' \rangle$

заданными и независимыми от  $\langle \bar{r} \rangle$ , то (3) представляют линейные связи между  $\langle n \rangle$  и  $\langle \bar{r} \rangle$ , что и приводит к эмпирическим формулам Смагоринского [14].

Из (1) также следует, что малые  $\alpha$  соответствуют большим амплитудам флуктуаций удельной влажности. Если распределение  $\alpha$  выбрать внутри диапазона  $\alpha \in [0, \bar{r}]$  с заданной величиной интервала изменчивости, то  $\langle \alpha \rangle$  несет информацию об амплитуде флуктуаций, и в предположении, что в верхних слоях тропосферы эти флуктуации выше, получим, что  $(1 - \langle \alpha \rangle)$  для верхних слоев тропосферы должно быть меньше, чем для нижних, что и наблюдается в эмпирических графиках Смагоринского.

Поскольку диапазон изменения  $\alpha$  зависит от  $\bar{r}$ , то формула (2) описывает по существу нелинейную зависимость  $n$  от  $\bar{r}$  (в отличие от формул Смагоринского).

Сделаем еще одно важное замечание. Если в модели циркуляции  $\bar{r}$  слабо зависит от  $\alpha$ , что, вообще говоря, и следует ожидать в модели циркуляции атмосферы с заданной температурой поверхности океанов, то из формулы (3) при заданном распределении  $\alpha'$  можно вычислить  $\langle \alpha' n' \rangle$ , и мы будем иметь формулы нелинейной связи между  $\langle n \rangle$  и  $\bar{r}$ . В этом случае численные эксперименты с моделью общей циркуляции атмосферы должны показать близкие результаты для величин  $\langle n \rangle$ , вычисленных при прямом моделировании распределения  $\alpha$  и при использовании вышеуказанных формул.

### ПОСТАНОВКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Эксперименты проводились с версией климатической модели ИВМ РАН с разрешением по горизонтали  $5 \times 4$  градусов по долготе и широте, соответственно. Высота верхней границы атмосферы бралась на уровне 60 км. Число уровней по высоте равно 31, с километровым разрешением в тропосфере. Температура поверхности океанов и распределение морских льдов заданы по данным наблюдений за каждый месяц расчета. Химический блок модели отключен, концентрации газов важных в радиации, таких как, озон, метан, закись азота, углекислый газ заданы. Облака в тропосфере могут образоваться на каждом модельном слое. По вертикали

эти облачные слои подразделяются на три группы: облака верхнего яруса, среднего и нижнего. Границы ярусов задаются по климатическим данным. Внутри каждого яруса облака в модели расположены друг под другом с максимальным перекрытием. Облака различных ярусов относительно друг друга располагаются случайным образом [17], тем самым формируя стохастическую структуру трехъярусной облачности по вертикали.

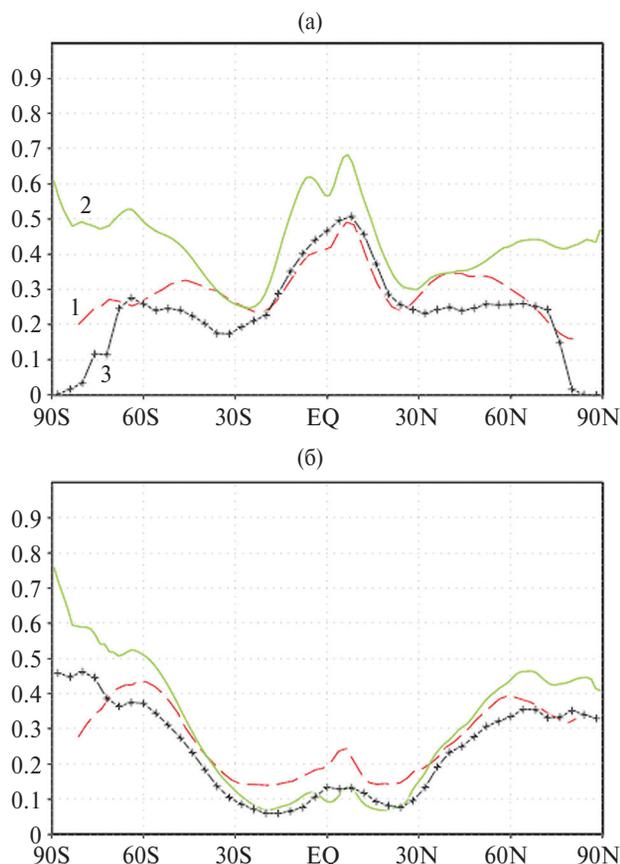
Формулу (1) для балла облаков запишем в виде:

$$n = \frac{\bar{r} - \alpha}{1 - \alpha}, \alpha \in (r_m, \bar{r}), \quad (4)$$

где  $r_m$  — некоторое минимальное значение относительной влажности, зависящее от высоты яруса. В наших расчетах величины  $r_m$  были взяты равными 0.55, 0.65, 0.75 для верхнего С1, среднего С2 и нижнего С3 ярусов, соответственно.

Для случайной величины  $\alpha$  мы выбрали простое равномерное распределение на отрезке  $(r_m, \bar{r})$  по генератору случайных чисел вычислительной машины (random\_number). На всех уровнях тропосферы и по всему земному шару величины  $\bar{r}$  моделируются динамически. Радиационные процессы в модели, и облачность соответственно, считаются через 3 часа, т.е. 8 раз за сутки. Это означает, что радиус корреляции случайного процесса равен примерно 3 часам. При очередном входе в радиационный блок значения  $\langle \bar{r} \rangle$  и  $\alpha$  будут новыми. В пределах отдельного яруса перекрытие облаков по вертикали считается максимальным.

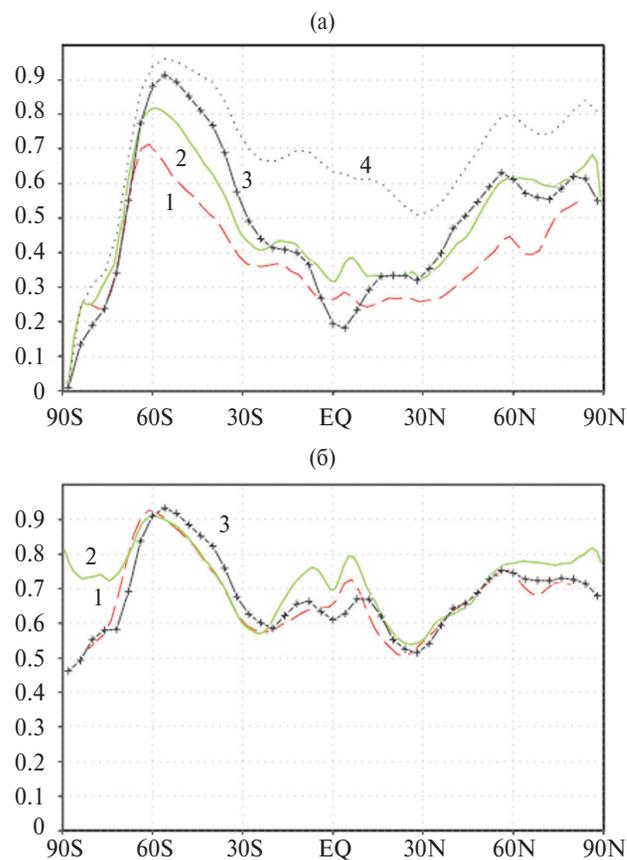
Расчеты велись, по аналогии с проектом AMIP, с заданной температурой поверхности океанов и распределением морских льдов, из произвольных начальных данных, с 1979 по 2005 г. Из всех результатов расчета мы проанализируем только среднегодовые баллы облаков по разным ярусам (С1, С2, С3) и общую облачность (CLD). Результаты моделирования сравниваются со спутниковыми наблюдениями [19] и с расчетами по модели ИВМ РАН по программе SMIP5 [18]. Отметим, что результаты [18] получены с версией модели климата ИВМ РАН с высоким пространственным разрешением и с учетом множества физических процессов, участвующих в формировании количества облаков. Таким образом, сравнение наших результатов с этой высоко развитой версией модели ИВМ РАН представляет несомненный интерес. Мы ограничимся анализом только зонально-осредненных величин балла облаков различных ярусов.



**Рис. 1.** Многолетние среднегодовые баллы облаков верхнего (а) и среднего (б) ярусов по спутниковым данным (1), по модели ИВМ РАН (2) и по результатам данной работы (3).

На рис. 1(а) приведены баллы облачности верхнего яруса  $C_1$  по результатам спутниковых измерений (1), по расчетам CMIP5 (2) и по нашим расчетам (3). Рис. 1(б) демонстрирует баллы облаков для среднего яруса  $C_2$ . Нетрудно видеть, что наши результаты весьма близки к данным спутниковых наблюдений CALIPSO. Следует еще раз отметить, что баллы облаков рассчитывались только по значениям относительной влажности на отрезке  $(r_m, \bar{r})$ .

Облака нижнего яруса расположены в зоне влияния планетарного пограничного слоя, поэтому форма распределения случайной величины  $\alpha$  должна зависеть от добавочных параметров, характеризующих крупномасштабную циркуляцию. В данной работе мы выбрали лишь один из них — вертикальную скорость, более того, ее направление. Так, на рис. 2(а) приведены графики  $C_3$  по данным спутниковых наблюдений CALIPSO (1), по расчетам CMIP5 (2) и нашим расчетам (4). В наших расчетах (4) учитывалась только относительная влажность. В следующем эксперименте дополнительно вводился



**Рис. 2.** Многолетние среднегодовые баллы облаков нижнего яруса (а) и общий балл (б). Обозначения как на рис. 1. Дополнительно приведен балл облаков нижнего яруса (а) без учета вертикальной скорости (4).

простейший учет конвекции. В этом случае балл облаков рассчитывался по формуле (4) при положительной средней вертикальной скорости, в противном случае балл облаков полагался равным нулю. Полученный таким образом результат для  $C_3$ , приведен на том же рис. 2(а) под номером (3). Теперь согласие с другими данными стало удовлетворительным. Наконец, на рис. 2(б) приведены графики полной облачности по всем трем источникам. Согласие и полной облачности с результатами CMIP5 и наблюдений можно считать удовлетворительным. Нетрудно видеть, что для облаков нижнего яруса действительно требуется более серьезное уточнение к формуле (4) с включением добавочных физических и динамических факторов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе мы рассмотрели один из вариантов динамико-стохастической параметризации балла неконвективной облачности в модели общей циркуляции атмосферы.

Мы использовали самые общие предположения о распределении полей влажности внутри ячейки интегрирования (не было использовано ни одной эмпирической константы). Тем не менее, результаты моделирования, которые мы привели в работе, выглядят очень обнадеживающими.

Исследование динамико-стохастического моделирования облачности в модели общей циркуляции атмосферы с заданной температурой поверхности океана, конечно, ограничивает возможности изучения чувствительности модельной циркуляции и, как следствие, балла облачности к методу параметризации. Ясно, что более перспективным в этом смысле является использование совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана, что будет сделано в будущем. Об этом также говорят и эксперименты с расчетом нескольких, не приводимых здесь, реализаций статистического моделирования, которые дали практически тождественные результаты. Были проведены также подобные расчеты по формуле (3), результаты которых были близки к результатам, приведенным в данной работе.

В заключение хочется повторить, что мы рассматриваем данную работу как первую попытку реализации динамико-стохастического подхода к моделированию циркуляции атмосферы, который нам представляется вполне перспективным.

Авторы благодарят А.В. Глазунова за полезные замечания, Е.М. Володина за предоставление результатов расчетов балла облачности в модели климата ИВМ РАН в рамках проекта SMIP5, и данных наблюдений спутникового проекта CALIPSO. Работа выполнена в ИВМ РАН при поддержке РФФ, грант 17-17-01305.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hasselmann K.* Stochastic climate models. Part. 1. Theory // *Tellus*. 1976. V. 28. № 6. P. 473–485.
2. *Дымников В.П.* О связи естественных ортогональных составляющих полей метеоэлементов с собственными функциями динамических операторов // *Изв. АН СССР*. 1988. Т. 24. № 7. С. 675–683.
3. *Демченко П.Ф., Кислов А.В.* Стохастическая динамика природных объектов. Броуновское движение и геофизические приложения // *М. ГЕОС*. 2010. 189 с.
4. *Franzke C., O’Kane T.J., Berner J., Williams P.D., Lucarini V.* Stochastic Climate Theory and Modeling // *Climate Change*. 6(1). 2015. P. 63–78. doi: <https://doi.org/10.1002/Wcc>. 318
5. *Palmer T.N., Doblas-Reyes F.-J., Weisheimer A., Shutts G.J., Berner J., Murphy J.H.* Towards the probabilistic Earth-System Modes // 2009. arxiv.org: 0812. 1074.
6. *Дымников В.П.* О предсказуемости изменений климата // *Изв. РАН. Физ. атм. и океана*. 1998. Т. 34. № 6. С. 741–751.
7. *Zeeman E.S.* Stability of dynamical systems // *Non-linearity*. 1988. № 1. P. 115–155.
8. *Дымников В.П., Грицун А.С.* Современные проблемы математической теории климата. // *Изв. РАН. Физ. атм. и океана*. 2005. Т. 41. № 3. С. 294–314.
9. *Kuksin S., Shirikyan A.* Rigorous results in space-periodic two-dimensional turbulence. // *Physics of Fluids*. 2017. 29. 125106.
10. *Клевова Ю.Ю.* О существовании стационарной меры для стохастической системы модели Лоренца бароклинной атмосферы // *Математический сборник*. 2013. Т. 204. № 9. С. 73–98.
11. *Клевова Ю.Ю.* О единственности стационарной меры для стохастической системы модели Лоренца бароклинной атмосферы // *Математический сборник*. 2015. Т. 206. № 3. С. 91–142.
12. *Дымников В.П.* О параметризации балла неконвективной облачности в задачах фонового прогноза погоды и общей циркуляции атмосферы // *Труды ЗСНИГМИ*. 1974. Вып. 11. С. 62–68.
13. *Sommeria G., Deardorf J.W.* Subgrid-scale condensation in models of nonprecipitating clouds // *J. Atm. Sci.* 1977. V. 34. № 2. P. 344–355.
14. *Smagorinsky J.* On the dynamical prediction of large-scale condensation by numerical methods // *Geophys. Monogr. Series*. 1960. № 5. P. 71–78.
15. *Дымников В.П.* Об одной постановке задачи прогноза полей влажности в атмосфере // *Изв. АН СССР. Физ. атм. и океана*. 1971. Т. 7. № 12. С. 1311–1314.
16. *Алексеев В.А., Володин Е.М., Галин В.Я., Дымников В.П., Лысков В.Н.* Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. М. Препринт ИВМ РАН № 2086-В98. 1998. 180 с.
17. *Галин В.Я.* Параметризация радиационных процессов в атмосферной модели ИВМ // *Изв. АН СССР. Физ. атм. и океана*. 1998. Т. 34. № 3. С. 380–389.
18. *Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V., Galin V.Ya., Lykosov V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Iakovlev N.G.* (2017). Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // *Climate Dynamics*. doi: 10.1007/s00382-017-3539-7
19. *Stubenrauch C.J., Cros S., Guignard A., Lamquin N.* A 6-year global cloud climatology from the Atmospheric InfraRed Sounder AIRS and a statistical analysis in synergy with CALIPSO and CloudSat. // *Atmos. Chem. Phys.* 10. 7197–7214. doi: <https://doi.org/10.5194/acp-10-7197-2010>.

## Dynamical-Stochastically Parametrization of Cloudiness in the Atmospheric General Circulation Model

V. Ya. Galin\*, V. P. Dymnikov\*\*

*Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS*

*Gubkina Str., 8, Moscow, 119333, Russia*

*e-mail: \*venergalin@yandex.ru, \*\*dymnikov.valentin@yandex.ru*

Received: 24.04.2019

Accepted: 29.05.2019

In the paper dynamical-stochastically method of the non-convective cloudiness parameterization in the general circulation model is formulated. This algorithms is evaluated on the basis of general circulation model with given sea surface temperature of oceans. The results of calculations were compared with observational data and the results simulations with sophisticated couple GCM full filled in frame of CMIP5 program. These results showed the perspectives of suggested dynamical-stochastically approach.

**Keywords:** cloudiness, general circulation model, dynamical-stochastically approach.