

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ МОЛНИЙ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ АТМОСФЕРНОЙ КОНВЕКЦИИ

¹А.Н. Плосков, ^{1,2}А.В. Елисеев, ²А.В. Чернокульский, ^{1,2}И.И. Мохов

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
plovkovanon92@mail.ru

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

CALCULATING FREQUENCY OF LIGHTNING WITH THE USE OF STATISTICAL CHARACTERISTICS OF ATMOSPHERIC CONVECTION

¹A.N. Plovkov, ^{1,2}A.V. Eliseev, ²A.V. Chernokulsky, ^{1,2}I.I. Mokhov

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
plovkovanon92@mail.ru

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of RAS, Moscow, Russia

Аннотация. Разработана модификация часто используемой схемы Прайса-Ринда для вычисления частоты молний (ЧМ), которая может быть использована при расчетах с большим шагом по времени и по пространству. При таких шагах по времени и пространству показатель степени в зависимости ЧВ от высоты конвективных облаков оказывается меньше в 2 раза над сушей и на четверть над океаном, чем в исходном варианте схемы Прайса-Ринда. Модифицированная версия схемы внедрена в климатическую модель (КМ) ИФА РАН. Результаты расчетов характеристик молниевой активности с модифицированной схемой лучше согласуются со спутниковыми данными для ЧМ, чем с исходной версией. В КМ ИФА РАН при глобальном потеплении (похолодании) ЧМ увеличивается (уменьшается) во все сезоны. Чувствительность частоты молний к изменению приповерхностной температуры атмосферы на глобальном уровне получена равной 10 % / К.

Ключевые слова: молниевая активность, конвективная активность, статистическое гамма-распределение, КМПС, КМ ИФА РАН, RCP 8.5.

Abstract. A modification of the commonly used Price-Rind scheme for lightning flashes frequency (LFF), which can be used for calculations with large spatial and time steps, is developed. With such steps, the exponent in the relationship of LFF on convective cloud heights appears to be smaller by a factor of two over land and by one fourth over ocean in comparison to that in the original Price-Rind scheme. The modified version is implemented into the IAP RAS climate model (CM). The results of the lightning flash frequency simulations with the modified scheme agree better with the satellite data than those with the original one. In the IAP RAS CM, global warming (cooling) leads to LFF increase (decrease) in all seasons. The sensitivity of lightning flashes frequency to the surface air temperature change at the global level is estimated equal to 10 % / K.

Keywords: lightning activity, convective activity, statistical gamma-distribution, LSMF, LSM IPA RAS, RCP 8.5.

ВСТУПЛЕНИЕ

В настоящее время климатические модели дополняются параметризациями молниевой активности, связывающих частоту молний с характеристиками конвективной облачности [Price, Rind, 1992; Mareev, Volodin, 2014]. К примеру, в [Price, Rind, 1992] частота молний (ЧМ) на единицу площади f связывается с высотой конвективных облаков h :

$$f = Ch^\alpha, \quad (1)$$

причем показатель степени α и коэффициент C различны для облаков континентального и морского происхождения.

Однако подобные параметризации не могут быть использованы в климатических моделях промежуточной сложности (КМПС), шаг по времени которых составляет 10^5 – 10^6 с и шаг вычислительной сетки $\sim 10^8$ м [Claussen et al., 2002]. Это на несколько порядков больше характерного времени жизни конвективных облачных систем (10^3 – 10^4 с) и их характерного пространственного масштаба (10^4 м). К числу КМПС относится климатическая модель Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН) [Мохов, Елисеев, 2012].

МОДИФИКАЦИЯ СХЕМЫ

Цель данной работы — модификация схемы [Price, Rind, 1992] для использования в КМПС, в том

числе в КМ ИФА РАН.

В связи с этим предлагается схема вычисления ЧМ, основанная на рассмотрении статистических ансамблей конвективных систем. При этом необходимо ввести функцию распределения вероятности для h . По данным измерений над Европейской территорией СССР [Мазин, Хргиан, 1989] эта функция может быть приближена гамма-распределением с параметром формы $a > 1$ и параметром масштаба b . Для такого распределения средняя высота облаков $H = ab$, стандартное отклонение высоты облаков $\sigma = a^{1/2}b$, а коэффициент вариации $k = \sigma/H = a^{-1/2}$. Из условия $a > 1$ следует, что $k < 1$.

При построении статистической выборки для различных $1 \text{ км} \leq H \leq 20 \text{ км}$ и $0 \leq k \leq 1$ с дополнительно предполагалось, что $h \leq h_{\max} = 20 \text{ км}$. По данным этой выборки вычислялось среднее по ансамблю $\langle f \rangle = C \langle h^\alpha \rangle$ (скобки означают осреднение по ансамблю). При каждом значении k показатель степени α определялся с использованием линейной регрессии $\ln \langle f \rangle$ на $\ln \langle h \rangle = \ln H$.

Результаты проведенных расчетов показали монотонное уменьшение α при увеличении k как над сушей, так и на океаном (рис. 1). При узком распределении для h ($k \ll 1$) значения показателя степени в (1) близки к рекомендованным в [Price, Rind, 1992]. При широком распределении ($k \rightarrow 1$) эти показатели уменьшаются до 2.6 над сушей и до 1.3 над океаном.

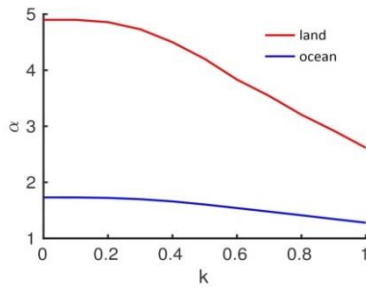


Рис. 1. Зависимость показателя степени α в соотношении (1) от коэффициента вариации k для функции распределения вероятности высоты конвективных облаков

При всех $0 \leq k \leq 1$ коэффициент корреляции регрессии $\ln \langle f \rangle$ на $\ln N$ превышает 0.96.

Схема, основанная на (1), была внедрена в КМ ИФА РАН. Дополнительно предполагалось, что молниевые вспышки возможны лишь в части ячейки, занятой конвективными облаками:

$$f = C h^\alpha n_{co}, \quad (2)$$

где n_{co} — количество конвективных облаков в вычислительной ячейке. Величина n_{co} вычислялась в соответствии с [Eliseev et al., 2013] с заданием высоты тропопаузы согласно [Мохов, 1993].

РЕЗУЛЬТАТЫ

С КМ ИФА РАН были проведены численные расчёты для периода 1700–2100 гг. при сценариях антропогенных воздействий с учетом изменения содержания парниковых газов (CO_2 , CH_4 и N_2O) в атмосфере, тропосферных и стратосферных вулканических сульфатных аэрозолей, изменения солнечной постоянной и изменения сельскохозяйственных площадей. Эти воздействия для 1700–2005 гг. задавались в соответствии с условиями «Historical simulations» проекта CMIP5 (Coupled Models Intercomparison Project, phase 5; [<http://www.Pasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb>]). Для периода 2006–2100 гг. соответствующие воздействия задавались в соответствии со сценарием RCP 8.5.

Все расчеты были проведены с версией модели, в которой показатели степени задавались в соответствии со значениями, полученными при коэффициенте вариации $k=1$ (версия М), а также со значениями из [Price, Rind, 1992] (версия О). В связи с учетом n_{co} в (2) были проведены расчеты как с полной схемой (2) (версия I), так и с ее вариантом, в котором вместо изменяющегося от года к году n_{co} использовалась многолетнее среднее (с учетом годового хода) количество конвективных облаков для доиндустриального периода (версия Р). Далее введены обозначения X–Y, где X — либо I, либо Р, а Y — либо М, либо О.

На глобальном уровне для современного периода результаты расчетов со всеми версиями КМ ИФА РАН хорошо согласуются со спутниковыми данными LIS/OTD (Lightning Imaging Sensor/Optical Transient Detector) [Cecil et al., 2014] для частоты молний. Если по этим данным для 1995–2014 гг. глобальная ЧМ $F_g = 46 \pm 5 \text{ c}^{-1}$, то в зависимости от версии КМ ИФА РАН для этого интервала времени

F_g изменяется от 44 c^{-1} до 47 c^{-1} (рис. 2). Однако при выделении суши и океана видно, что версии I–М и Р–М гораздо лучше согласуются с данными LIS/OTD, чем версии I–О и Р–О. В частности, если в первых двух версиях для 1995–2014 гг. при осреднении над сушей $F_l = 35\text{--}37 \text{ c}^{-1}$ (в удовлетворительном согласии с данными LIS/OTD, в которых соответствующее значение равно $41 \pm 4 \text{ c}^{-1}$), то в последних двух версиях — $26\text{--}27 \text{ c}^{-1}$ (уже значительно меньше эмпирической оценки). При переходе от версий О к версиям М также существенно улучшается согласие осредненной над океанами ЧМ со спутниковыми данными. Если в версиях I–М и Р–М соответствующее значение для периода 1995–2014 гг. равно $8\text{--}9 \text{ c}^{-1}$ (по данным LIS/OTD — $5 \pm 1 \text{ c}^{-1}$), то в версиях I–О и Р–О оно равно $18\text{--}20 \text{ c}^{-1}$.

Согласно полученным результатам, в XXI–XX веках климатические изменения не приводят к существенным изменениям частоты молниевых вспышек в КМ ИФА РАН как на глобальном (рис. 2), так и на региональном масштабах ($\leq 10\%$). Кратковременные похолодания после вулканических извержений приводят к общему уменьшению ЧМ. После извержения вулкана Тамбора (1815 г.) значение F_g уменьшилось от 44.1 c^{-1} до 39.6 c^{-1} , а после извержения вулкана Пинатубо (1991 г.) — от 45.1 c^{-1} до 43.6 c^{-1} . Уменьшение f при этом максимально по абсолютной величине в тропиках и субтропиках.

Потепление климата в XXI веке приводит к увеличению частоты молниевых вспышек. В версии I–М при сценарии RCP 8.5 величина F_g увеличивается к 2090–2100 гг. до 58 c^{-1} , т. е. чуть более чем на четверть относительно соответствующего значения для 1995–2014 гг. Частота молниевых вспышек на единицу площади изменяется во все сезоны не более чем на 10% в тропиках над океанами между 1995–2014 гг.

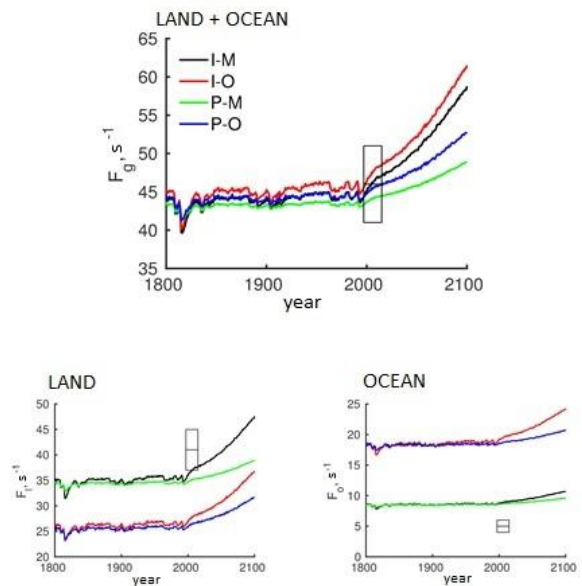


Рис. 2. Глобальная (в том числе отдельно над сушей и над океаном) среднегодовая частота молниевых вспышек в численных экспериментах с КМ ИФА РАН. Прямоугольниками показаны соответствующие оценки по спутниковым данным LIS/OTD (средние и интервалы неопределенности)

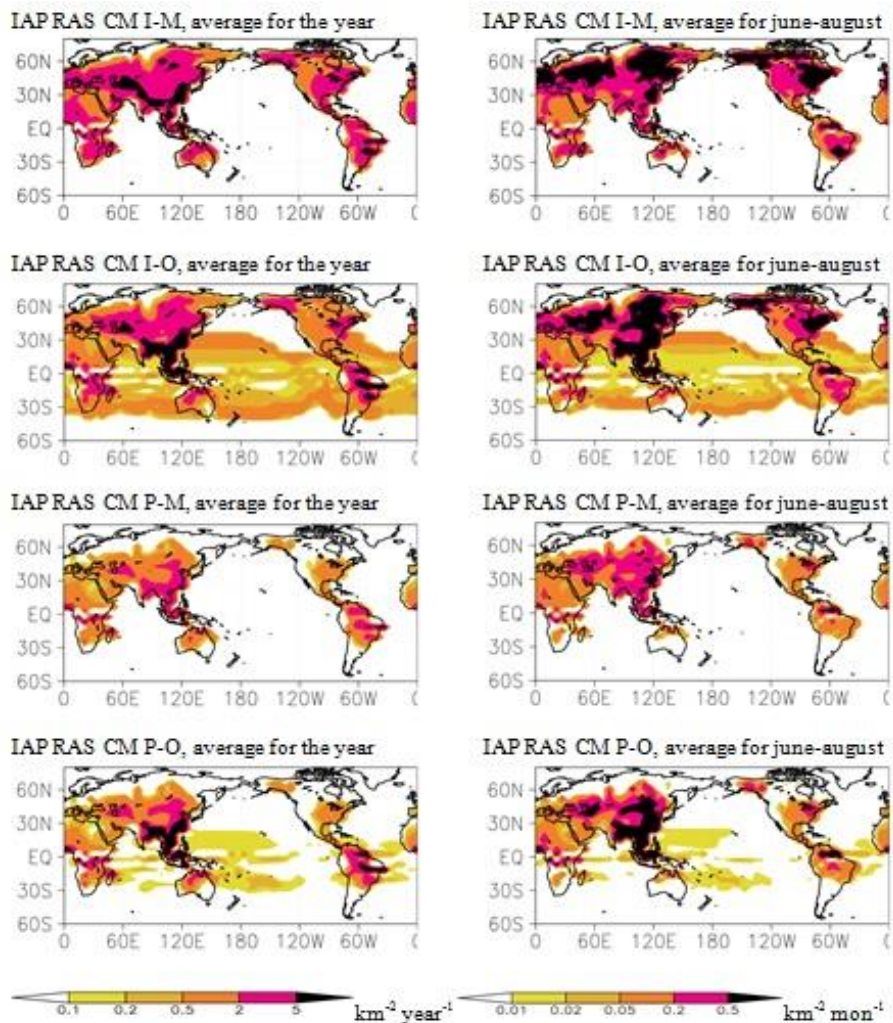


Рис. 3. Изменение частоты молниевых вспышек на единицу площади от 1995–2014 гг. до 2090–2100 гг. в различных версиях КМ ИФА РАН

и 2090–2100 гг. (рис. 3). В регионах максимальной ЧМ в современный период (на юго-востоке Азии, в центре Африки и в центральной Америке) f к концу XXI века увеличивается на 10–20 %; абсолютные изменения частоты молний максимальны в этих регионах. Над континентами в средних широтах увеличение ЧМ к концу XXI в. превышает двукратное относительно современного периода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Мазин И.П., Хргиан А.Х. Облака и облачная атмосфера. Л.: Гидрометиздат, 1989. 647 с.
 Мохов И.И. Диагностика структуры климатической системы СПб.: Гидрометиздат, 1993. 271 с.
 Мохов И.И., Елисеев А.В. Моделирование глобальных климатических изменений в XX–XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP // ДАН. 2012. Т. 443, № 6. С. 732–736.

Cecil D.J., Buechle D.E., Blakeslee R.J. Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: Dataset description // Atmos. Res. 2014. V. 135–136. P. 404–414.
 Claussen M., et al. Earth system models of intermediate complexity: closing the gap in the spectrum of climate system models // Clim. Dyn. 2002. V. 18, N 7. P. 579–586.
 Eliseev A.V. et al. Scheme for calculation of multi-layer cloudiness and precipitation for climate models of intermediate complexity // Geosci. Model Devel. 2013. V. 6, N 5. P. 1745–1765.
 Mareev E.A., Volodin E.M. Variation of the global electric circuit and ionospheric potential in a general circulation model // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41, N 24. P. 9009–9016.
 Price C., Rind D. A simple lightning parameterization for calculating global lightning distributions // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 1992. V. 97, N D9. P. 9919–9933.