

УДК 551.511

СВЯЗЬ ЧАСТОТЫ МОЛНИЙ СО СТАТИСТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ КОНВЕКТИВНОЙ АКТИВНОСТИ В АТМОСФЕРЕ

А. В. Елисеев^{1,2,3,*}, А. Н. Плосков¹, А. В. Чернокульский²,
академик РАН И. И. Мохов^{1,2,4}

Поступило 03.07.2018 г.

Разработана модификация часто используемой схемы Прайса—Ринда для вычисления частоты молний (ЧМ), которая может быть использована при расчётах с большим шагом по времени и пространству. При таких шагах по времени и пространству показатель степени в зависимости частоты вспышек 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 расчётов характеристик молниевой активности с модифицированной схемой лучше согласуются со спутниковыми данными для частоты молний, 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: вспышки молний, конвективная активность, статистическое гамма-распределение, EMIC, IAP RAS CM, сценарий RCP 8.5.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485176-82>

Молниевая активность связана как с динамическими процессами в атмосфере, так и с процессами атмосферного электричества [1]. Она важна для экологических приложений (молниевые удары часто служат причиной природных пожаров) и для задач химии атмосферы (по существующим оценкам молниевые вспышки генерируют около 15% массы окислов азота в атмосфере) [1]. Как следствие, в настоящее время в климатические модели внедряются параметризации молниевой активности, связывающие частоту молниевых вспышек с характеристиками конвективной облачности [2–5]. В частности, в [2] частота молний (ЧМ) на единицу площади f связывается с высотой верхней границы конвективной облачности h :

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

причём значения показателя степени α (а также коэффициента C) различны для конвективных облаков континентального и морского происхождения: для облаков первого типа $\alpha = 4,9$, второго $\alpha = 1,7$.

Однако такие параметризации не могут быть использованы в климатических моделях промежуточной сложности (КМПС) с шагом вычислительной сетки по пространству $\sim 10^8$ м и шагом по времени 10^5 – 10^6 с [6]; эти значения на несколько порядков превышают соответственно характерный пространственный масштаб конвективных облачных систем (10^4 м) и характерное время их жизни (10^3 – 10^4 с). Как следствие, в КМПС на каждом шаге по времени и в каждой горизонтальной модельной ячейке реализуется уже набор конвективных систем. При этом “средние” (воспроизводимые моделью) характеристики этих систем получают пространственно-временным осреднением индивидуальных конвективных систем. Такое осреднение работает как сглаживающий оператор, понижая порядок степени в (1).

К числу КМПС относится климатическая модель Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (КМ ИФА РАН) [7] — единственная российская модель такого класса. Особенностью КМ ИФА РАН являются явный расчёт крупномасштабного (с временным и пространственным масштабами, превышающими соответствующие значения для синоптических процессов) состояния системы и параметризованные вычисления статистических характеристик синоптических процессов. Пространственное разрешение КМ ИФА РАН составляет $4,5^\circ$ по широте и 6° по долготе, шаг по времени 5 сут. Подобно остальным

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской Академии наук, Москва

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет

⁴ Московский физико-технический институт (государственный университет)

*E-mail: eliseev@ifaran.ru

КМПС это не позволяет разрешать явно отдельные конвективные облака или даже отдельные системы таких облаков.

Цель данной работы — модификация схемы [2] для использования в КМПС, внедрение этой схемы в климатическую модель ИФА РАН и анализ чувствительности характеристик молниевой активности при климатических изменениях в численных экспериментах с КМ ИФА РАН.

Обобщение схем вычисления ЧМ можно провести, если рассмотреть не отдельные конвективные системы, а статистический ансамбль таких систем. При этом необходимо ввести функцию распределения вероятности для h . По данным измерений над европейской территорией СССР [8] эта функция может быть приближена гамма-распределением с параметром формы $a > 1$ и параметром масштаба b . Подобное также может быть получено для максимальной высоты радарного эха от грозовых облаков [9]. 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 $k < 1$. Отметим, что по данным зондирования для максимальной высоты радарного эха от грозовых облаков $k < 0,3$ [9].

При численных расчётах для h при различных $1 \leq H \leq 20$ км и $0 \leq k \leq 1$ для гамма-распределения, соответствующего таким H и k , строилась статистическая выборка. При этом для исключения очень больших и не соответствующих наблюдениям (см., например, [8]) значений h предполагали, что $h \leq h_{\max} = 20$ км. По данным этой выборки вычисляли среднее по ансамблю $\langle f \rangle = C \langle h^\alpha \rangle$ (треугольные скобки означают осреднение по ансамблю). Затем при каждом значении k показатель степени α определяли с использованием линейной регрессии $\ln \langle f \rangle$ на $\ln \langle h \rangle = \ln H$.

Результаты проведённых расчётов выявили 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 [1]. При широком распределении ($k \rightarrow 1$) эти показатели уменьшаются до 2,6 над сушей и до 1,3 над океаном. При всех $0 \leq k \leq 1$ коэффициент корреляции регрессии $\ln \langle f \rangle$ на $\ln H$ превышает 0,96. Как следствие, соотношение (1) с модифицированным значением α действительно можно использовать для вычисления ЧМ в КМПС.

Схема, основанная на (1), была внедрена в КМ ИФА РАН. Дополнительно предполагалось, что мол-

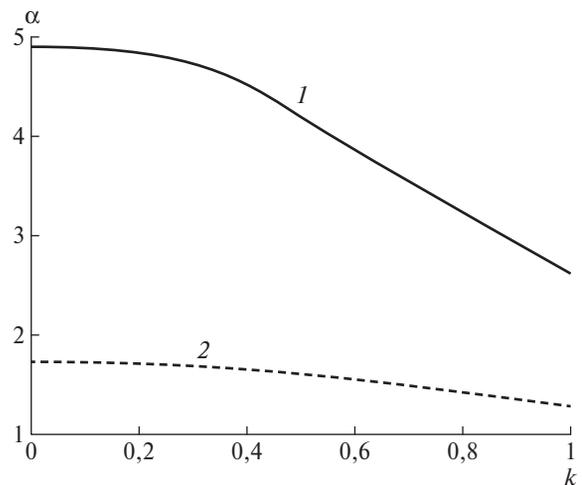


Рис. 1. Зависимость показателя степени α в соотношении (1) от коэффициента вариации k для функции распределения вероятности высоты конвективной облачности; 1 — суша, 2 — океан.

ниевые вспышки возможны лишь в части ячейки, занятой конвективной облачностью. В результате вместо (1) в КМ ИФА РАН использовали функциональную зависимость

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

где n_{co} — количество конвективной облачности в вычислительной ячейке КМПС. Величину n_{co} вычисляли в соответствии с [10]. Высоту тропопаузы, необходимую для расчёта H , в КМ ИФА РАН задавали согласно [11] в виде многочлена третьей степени от приповерхностной температуры атмосферы. Следует отметить, что множитель n_{co} при расчёте ЧМ в соответствии со схемой [2] (или подобными ей) ранее в климатических моделях не учитывался (см., например, [2–5]).

С КМ ИФА РАН были проведены численные расчёты для периода 1700–2100 гг. при сценариях антропогенных воздействий с учётом 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. принимали 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 расчёты были проведены с версией модели, в которой показатели степени задавались в соответствии со значениями, полученными при коэффи-

коэффициенте вариации $k = 1$ (версия М), а также со значениями из [2] (версия О). В связи с учётом n_{co} в (2) были проведены расчёты как с полной схемой (2) (версия I), так и с её вариантом, в котором вместо изменяющегося от года к году n_{co} использовалось многолетнее среднее (с учётом годового хода) количество конвективной облачности 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 все версии КМ ИФА РАН хорошо согласуются со спутниковыми данными LIS/OTD (Lightning Imaging Sensor/Optical Transient Detector) [12]. Если по данным наблюдений для 1995–2014 гг. глобальная ЧМ $F_g = 46 \pm 5 \text{ с}^{-1}$, то в зависимости от версии КМ ИФА РАН для этого интервала времени F_g изменяется от 44 до 47 с^{-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 $F_l = 35\text{--}37 \text{ с}^{-1}$ (в удовлетворительном согласии с данными LIS/OTD, в которых соответствующее значение равно $41 \pm 4 \text{ с}^{-1}$), то в последних двух версиях — $26\text{--}27 \text{ с}^{-1}$ (уже значительно меньше эмпирической оценки). При переходе от версий О к версиям М также существенно улучшается согласие осреднённой над океанами ЧМ со спутниковыми данными. Если в версиях I-М и Р-М соответствующее значение для периода 1995–2014 гг. равно $8\text{--}9 \text{ с}^{-1}$ (по данным LIS/OTD — $5 \pm 1 \text{ с}^{-1}$), то в версиях I-О и Р-О оно равно $18\text{--}20 \text{ с}^{-1}$.

Улучшение согласия f со спутниковыми данными при переходе от версий О к версиям М наиболее значимо для Центральной Африки, тропических акваторий океана, для юго-востока Северной Аме-

рики и Центральной Евразии (рис. 3). Следует отметить, что, несмотря на улучшение воспроизведения f для Центральной Африки, ЧМ здесь остаётся меньше, чем для Центральной Америки. Это несоответствие, впрочем, характерно для всех современных климатических моделей с параметризацией ЧМ [3–5].

Согласно полученным результатам, в XIX–XX вв. климатические изменения не приводят к существенным изменениям частоты молниевых вспышек в КМ ИФА РАН как в глобальном (рис. 2), так и региональном масштабах ($\leq 10\%$). Это согласуется с результатами расчётов с моделью общей циркуляции атмосферы ECHAM6 [4]. Кратковременные похолодания после вулканических извержений приводят к общему уменьшению ЧМ. После извержения вулкана Тамбора (1815 г.) значение F_g уменьшилось от 44,1 до 39,6 с^{-1} , а после извержения вулкана Пинатубо (1991 г.) — от 45,1 до 43,6 с^{-1} . Уменьшение f при этом максимально по абсолютной величине в тропиках и субтропиках.

Потепление климата в XXI в. 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 с^{-1} , т.е. чуть более чем на четверть относительно соответствующего значения для 1995–2014 гг. — близко к соответствующему значению, полученному с моделью ECHAM6 [4]. Частота молниевых вспышек на единицу площади изменяется во все сезоны не более чем на 10% в тропиках над океанами между 1995–2014 и 2090–2100 гг. В регионах максимальной ЧМ в современный период (на юго-востоке Азии, в центре Африки и в Центральной Америке) f к концу XXI в. увеличивается на 10–20%; абсолютные изменения ЧМ максимальны в этих регионах (рис. 4). Над континентами в средних широтах увеличение частоты вспышек

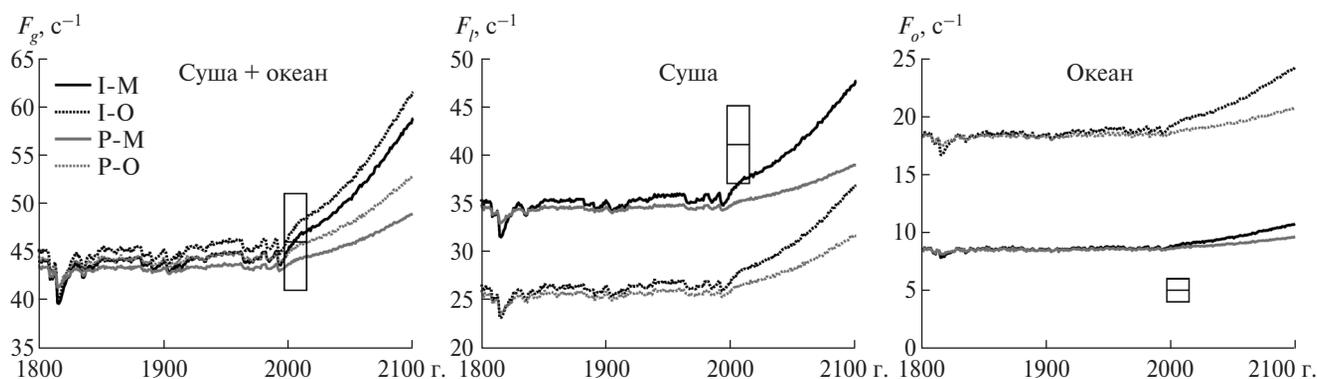


Рис. 2. Глобальная (в том числе отдельно над сушей и над океаном) среднегодовая частота молниевых вспышек в численных экспериментах с КМ ИФА РАН. Прямоугольниками показаны соответствующие оценки по спутниковым данным LIS/OTD (средние и интервалы неопределённости).

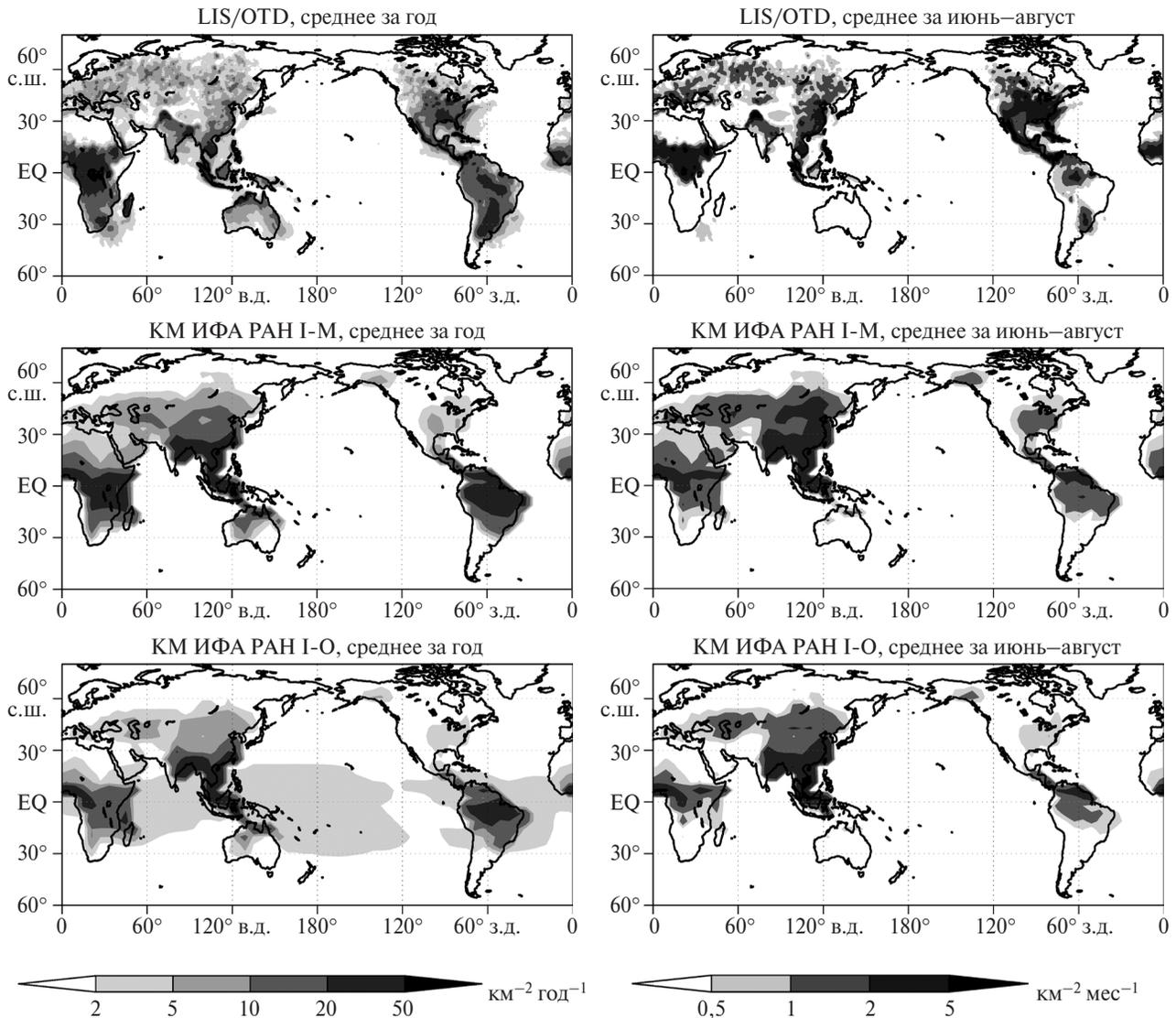


Рис. 3. Частота молниевых вспышек на единицу площади в 1995–2014 гг. по данным наблюдений LIS/OTD и в расчётах с различными версиями КМ ИФА РАН.

к концу XXI в. превышает двукратное относительно современного периода.

Уменьшение показателей степени α в (2) (переход от версий О к версиям М) приводит к резкому уменьшению отклика среднегодовых значений f над океанами в тропиках (рис. 4). При этом в других регионах среднегодовой отклик f меняется не очень значительно. Для обеих версий I модели пространственная структура отклика f принципиально различается для разных сезонов. Если в среднем за год отклик максимален в тропиках и субтропиках, то летом в этих версиях климатические изменения f над континентами средних широт в XXI в. при сценарии RCP 8.5 подобны по абсолютной величине полученным для более низких широт.

Сравнение версий I и Р модели свидетельствует о том, что высокая чувствительность f к изменениям

климата над континентами средних широт связана с соответствующими изменениями количества конвективной облачности: n_{co} в этих регионах летом значительно увеличивается в XXI в. при сценарии RCP 8.5 (рис. 4). Это согласуется с увеличением количества конвективной облачности над Евразией и Северной Америкой, выявленным по данным наблюдений при потеплении климата в последние десятилетия XX в. [13], и связано с изменением статической устойчивости атмосферы [14]. Следует отметить, что полученное в расчётах с КМ ИФА РАН изменение n_{co} может не проявляться в других моделях. Например, в климатической модели INMCM4 площадь регионов, в которых проявляются конвективные процессы в атмосфере, уменьшается при потеплении климата [3]. Кроме того, тенденции изменения количества конвективной облачности

КМ ИФА РАН

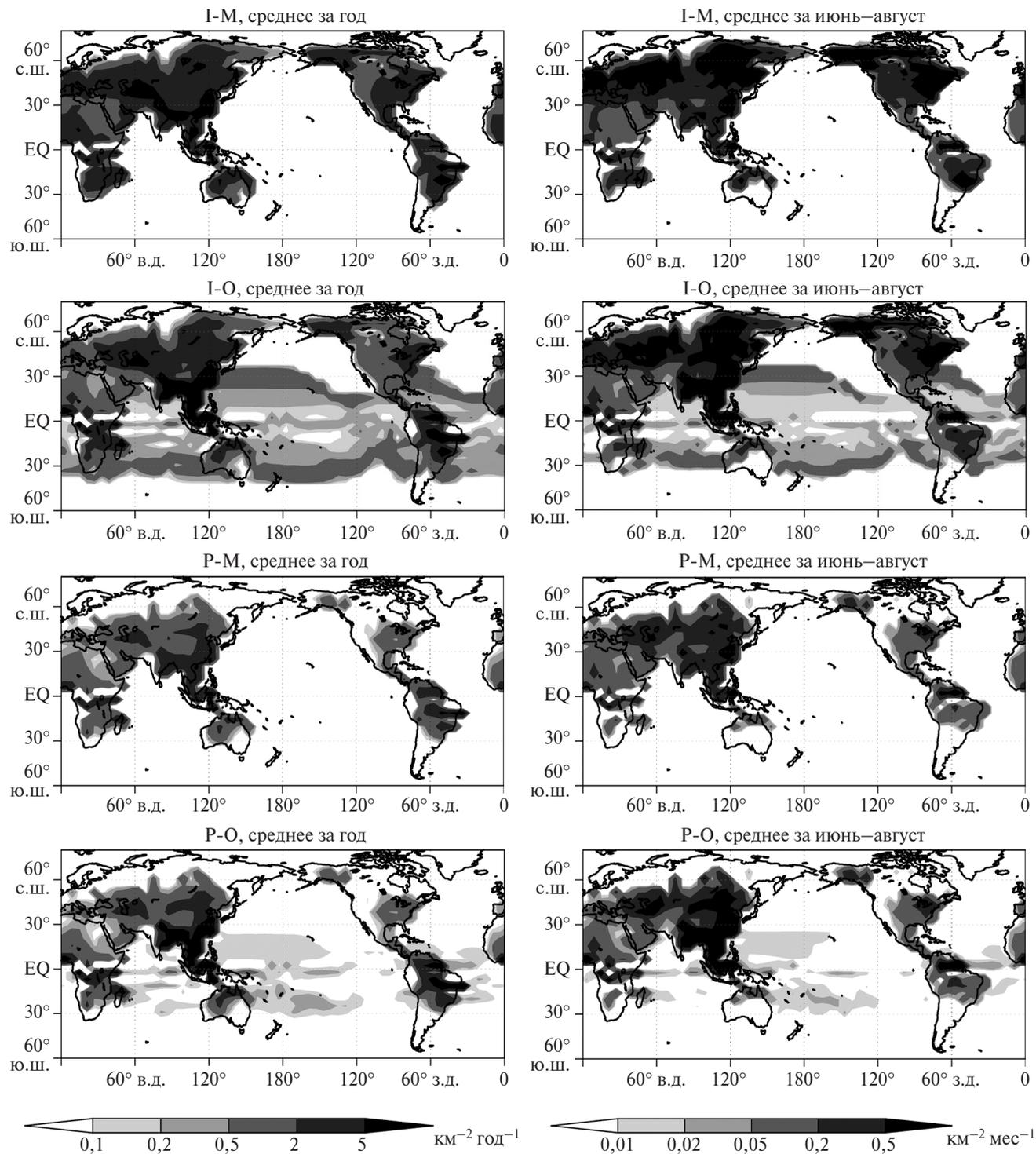


Рис. 4. Изменение частоты молниевых вспышек на единицу площади от 1995–2014 до 2090–2100 гг. в различных версиях КМ ИФА РАН.

различаются вплоть до знака по разным массивам данных для конца XX в. [15].

Для версий Р КМ ИФА РАН, в которых не учитывается изменение количества конвективной облачности при климатических изменениях, чувстви-

тельность f к изменениям климата существенно меньше, чем для версий I, особенно в средних широтах над континентами (рис. 4). Это связано с неучётом существенного увеличения количества конвективной облачности в этих регионах в тёплый

период года. Для версии О при этом дополнительно проявляется уменьшение чувствительности ЧМ над океанами тропиков.

Развитие параметризации частоты молний в данной работе играет существенную роль для определения значения чувствительности K_g глобальной ЧМ к изменениям климата. Уменьшение показателя степени в соотношениях (1) и (2) (переход от версий О к версиям М) уменьшает эту чувствительность. Для версии I-M она равна 9,7%/К, тогда как для I-O — 10,9%/К (рис. 2). Эти значения близки к полученным с моделью общей циркуляции атмосферы ЕСНАМ6 [4]. По расчётам с КМ ИФА РАН примерно половина значения K_g связана с ростом количества конвективной облачности n_{co} при климатических изменениях. Для версий Р-М и Р-О, в которых изменение n_{co} при климатических изменениях не влияет на f , величина K_g равна 3,7 и 5,8%/К соответственно. Эти значения находятся в пределах интервала значений K_g для разных моделей (от -3 до $+14\%/К$ [3–5]).

Согласно рис. 2, относительная чувствительность ЧМ к климатическим изменениям больше над сушей, чем над океаном (K_l и K_o соответственно). Для версий I-M и I-O $K_l = 11$ и $13\%/К$ соответственно, а $K_o = 7$ и $9\%/К$ соответственно. Для версий Р-М и Р-О $K_l = 3,9$ и $7,6\%/К$ соответственно, а $K_o = 3,7$ и $3,8\%/К$ соответственно. Все эти значения находятся внутри интервалов $-4 \leq K_l \leq +17\%/К$ и $-6 \leq K_o \leq +10\%/К$, полученных при различных параметризациях ЧМ в модели общей циркуляции атмосферы САМ5 [5].

Таким образом, разработана модификация пространственной схемы [2] для вычисления ЧМ, которая может быть использована для моделей с большим шагом по времени и пространству, а также при расчётах, для которых доступны лишь данные с временным разрешением, недостаточным для оценки мгновенных значений характеристик конвективной активности в атмосфере. Пространственно-временное осреднение приводит к понижению показателя степени в зависимости ЧМ от высоты верхней границы грозовых облаков. При достаточно широком (с единичным коэффициентом вариации) распределении вероятности для высоты грозовых облаков этот показатель степени уменьшается относительно случая единичных конвективных систем в 2 раза над сушей и на четверть над океаном.

Модифицированная версия схемы, учитывающая, что молниевая активность возможна только в покрытой облаками части модельной ячейки, внедрена в КМ ИФА РАН, с которой проведены чис-

ленные эксперименты в соответствии с условиями международного проекта сравнения климатических моделей СМIP5. В этих расчётах получено, что характеристики молниевой активности при модифицированной схеме лучше согласуются со спутниковыми данными о ЧМ, чем в исходной версии. При этом, с одной стороны, уменьшение показателя степени зависимости ЧМ-вспышек от средней высоты конвективной облачности уменьшает чувствительность частоты молниевых вспышек к изменениям климата. С другой стороны, положительная корреляция количества конвективной облачности с температурой тропосферы увеличивает климатическую чувствительность ЧМ. Глобальное потепление (похолодание) климата во все сезоны сопровождается увеличением (уменьшением) ЧМ. При этом чувствительность глобальной частоты молниевых вспышек к изменению приповерхностной температуры атмосферы для основной версии I-M модели получена равной $10\%/К$.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17–29–05098 с использованием результатов, полученных в рамках других проектов РФФИ и программ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rakov V.A., Uman M.A.* Lightning: Physics and Effects. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2003. 687 p.
2. *Price C., Rind D.* // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 1992. V. 97. № D9. P. 9919–9933.
3. *Mareev E.A., Volodin E.M.* // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41. № 24. P. 9009–9016.
4. *Krause A., Kloster S., Wilkenskeld S., et al.* // J. Geophys. Res.: Biogeosciences. 2014. V. 119. № 3. P. 312–322.
5. *Clark S.K., Ward D.S., Mahowald N.M.* // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44. № 6. P. 2893–2901.
6. *Claussen M., Mysak L.A., Weaver A.J., et al.* // Clim. Dyn. 2002. V. 18. № 7. P. 579–586.
7. *Мохов И.И., Елисеев А.В.* // ДАН. 2012. Т. 443. № 6. С. 732–736.
8. *Мазин И.П., Хргиан А.Х.* Облака и облачная атмосфера. Л.: Гидрометиздат, 1989. 647 с.
9. *Брылев Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминога Г.Л.* Радиолокационные характеристики облаков и осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 234 с.
10. *Eliseev A.V., Coumou D., Chernokulsky A.V., et al.* // Geosci. Model Develop. 2013. V. 6. № 5. P. 1745–1765.
11. *Мохов И.И.* Диагностика структуры климатической системы. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 271 с.
12. *Cecil D.J., Buechler D.E., Blakeslee R.J.* // Atmos. Res. 2014. V. 135/136. P. 404–414.
13. *Sun B., Groisman P.Ya., Mokhov I.I.* // J. Clim. 2001. V. 14. № 8. P. 1864–1880.

14. Мохов И.И., Акперов М.А. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 4. С. 467–475.
15. Norris J.R. // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2005. V. 110. № D8. D08206.

RELATIONSHIP OF LIGHTNING FLASHES FREQUENCY WITH STATISTICAL CHARACTERISTICS OF CONVECTIVE ACTIVITY IN THE ATMOSPHERE

A. V. Eliseev, A. N. Ploskov, A. V. Chernokulsky, Academician of the RAS I. I. Mokhov

Received July 3, 2018

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 flashes, convective activity, statistical gamma-distribution, EMIC, IAP RAS CM, scenario RCP 8.5.