

Влияние различных параметров модели климата ИВМ РАН на воспроизведение экстремальных осадков

М. А. Тарасевич¹ and Е. М. Володин²

¹ Московский физико-технический институт (МФТИ НИУ), 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9, E-mail: mashatarasevich@gmail.com

² Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука Российской Академии Наук (ИВМ РАН), 119333, г. Москва, ул. Губкина, 8, E-mail: volodinev@gmail.com,

Аннотация

Рассматривается воспроизведение индексов экстремальности погоды двумя версиями климатической модели ИВМ РАН (INMCM4, INMCM5) для современного климата. Показано, что в модели INMCM5 улучшилось воспроизведение практически всех индексов, связанных с температурой и средними осадками, но ухудшилось воспроизведение индексов, связанных с экстремально большими осадками. Были проанализированы различные физические факторы, оказывающие влияние на осадки. В модель была добавлена параметризация вертикального перемешивания горизонтальных компонент скорости, обусловленного крупномасштабной конденсацией, а также учёт сопротивления воздуха, действующего на падающие осадки. Проведена настройка соответствующих параметров модели. Приводятся результаты, отражающие влияние рассматриваемых физических факторов на воспроизведение моделью индексов экстремальности.

Введение

Современные модели климата Земли могут воспроизводить не только среднее состояние климата, но и экстремальные погодно-климатические явления. Поэтому возникает задача сравнения климатических моделей по наблюдаемым экстремальным погодным явлениям. Воспроизведение различных экстремальных погодно-климатических ситуаций наиболее полно описано в [1, 2]. Согласно предложенному там подходу определяются 27 индексов экстремальности, характеризующих различные ситуации с высокой и низкой температурой, с сильными осадками или их отсутствием. Сравнение воспроизведения индексов экстремальности моделью климата INMCM4 [3] с данными других моделей, участвовавших в проекте CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5) [2] показывает, что эта модель воспроизводит неплохо многие индексы экстремальности, однако, по воспроизведению индексов, связанных с минимальной за сутки температурой, она является одной из худших.

В следующей версии модели (INMCM5) параметризации физических процессов были заменены или перенастроены [4, 5], так что можно ожидать и изменения качества воспроизведения индексов экстремальности.

Для сравнения с результатами моделирования в качестве наблюдаемых используются данные реанализа ERA-Interim [6], которые интерполируются на сетку, используемую в различных версиях климатической модели ИВМ РАН. Сравниваются данные, усреднённые за 1981–2010 г.

Чтобы оценить воспроизведение экстремальных погодных событий, по данным двух версий модели климата ИВМ РАН (INMCM4, INMCM5) и реанализа были вычислены индексы экстремальности [7]. Показателем качества воспроизведения индекса является взвешенное с косинусом широты среднеквадратичное отклонение этого индекса по данным модели от соответствующих данных реанализа, усреднённое по узлам сетки, соответствующим суше.

Название	Обозначение, единицы	INMCM4	INMCM5	INMCM5VM	INMCM5AR
Максимум T_{\max}	TXx, К	4.6	3.7	3.5	3.5
Минимум T_{\max}	TXn, К	5.4	4.8	5.4	5.4
Максимум T_{\min}	TNx, К	3.0	2.3	2.3	2.4
Минимум T_{\min}	TNn, К	13.4	6.7	7.4	7.7
Амплитуда суточного хода температуры	DTR, К	6.4	2.8	2.7	2.8
Вегетационный период	GSL, сут	24	15	15	15
Морозные дни	FD, сут	58	20	21	22
Ледяные дни	ID, сут	15	11	11	12
Летние дни	SU, сут	45	40	37	37
Тропические ночи	TR, сут	99	48	51	57
Холодные дни	TX10p, %	1.2	1.0	1.2	1.1
Холодные ночи	TN10p, %	1.1	0.9	1.2	1.1
Тёплые дни	TX90p, %	1.7	1.7	1.9	1.8
Тёплые ночи	TN90p, %	1.7	1.7	1.7	1.7
Продолжительность тёплых периодов	WSDI, сут	4.7	4.9	4.7	4.4
Продолжительность холодных периодов	CSDI, сут	3.2	3.1	3.4	3.1

Таблица 1: Среднеквадратичное отклонение температурных индексов экстремальности по данным моделей INMCM4, INMCM5, INMCM5VM ($A_0 = 7.5$, $C_{\text{INC}} = 3$), INMCM5AR ($W_{\text{ж}} = 5$ м/с, $W_{\text{тв}} = 0.5$ м/с, $A_0 = 8$, $C_{\text{INC}} = 2$) от реанализа ERA-Interim

В таблицах 1 и 2 представлены названия индексов экстремальности, связанных с температурой и осадками, их обозначения и единицы измерения, а также, среднеквадратичные отклонения этих индексов по данным различных версий климатической модели ИВМ РАН от данных реанализа ERA-Interim, усреднённые по точкам суши.

Таблица 1 показывает, что воспроизведение практически всех температурных индексов улучшилось в модели INMCM5 по сравнению с INMCM4. В частности, значительно (на 37–56%) улучшилось воспроизведение индексов экстремальности, связанных с минимальной за сутки температурой: годового минимума минимальной за сутки температуры (TNn), количества морозных дней (FD) и тропических ночей (TR), амплитуды суточного хода температуры (DTR), вегетационного периода (GSL).

Таблица 2 демонстрирует, что в INMCM5 заметно улучшилось воспроизведение количества дней с сильными (R10mm) и очень сильными (R20mm) осадками, продолжительности дождливого периода (CWD), средней интенсивности осадков (SDII) и суммарных осадков (PRCPTOT). Вместе с тем, ухудшилось воспроизведение индексов, связанных с интенсивностью (RX5day) и количеством (R95p) осадков в очень дождливые дни.

Название	Обозначение, единицы	INMCM4	INMCM5	INMCM5VM	INMCM5AR
Количество дней с осадками	R1mm, сут	41	40	39	39
Количество дней с сильными осадками	R10mm, сут	32	26	24	22
Количество дней с очень сильными осадками	R20mm, сут	9.8	6.2	6.5	6.3
Продолжительность сухого периода	CDD, сут	35	37	38	36
Продолжительность дождливого периода	CWD, сут	46	30	27	27
Интенсивность осадков	SDII, мм/сут	1.7	1.5	1.5	1.4
Максимальные осадки за 1 день	RX1day, мм	19	19	17	15
Максимальные осадки за 5 дней	RX5day, мм	28	43	40	36
Осадки за очень дождливые дни	R95p, мм	120	130	130	120
Осадки за экстремально дождливые дни	R99p, мм	57	53	49	48
Суммарные осадки	PRCPTOT, мм	550	480	470	450

Таблица 2: Среднеквадратичное отклонение индексов экстремальности, связанных с осадками, по данным моделей INMCM4, INMCM5, INMCM5VM ($A_0 = 7.5$, $C_{INC} = 3$), INMCM5AR ($W_{ж} = 5$ м/с, $W_{тв} = 0.5$ м/с, $A_0 = 8$, $C_{INC} = 2$) от реанализа ERA-Interim

На рисунках 1а), б)–3а), б) представлены пространственные распределения количества осадков за самый дождливый день в году (RX1day) и за самые дождливые 5 после-

довательных дней в году (RX5day) по данным реанализа ERA-Interim и их отклонения по данным INMCM5 от реанализа.

Рисунки 1а), б)–3а), б) демонстрируют, что INMCM5 завышает RX1day и RX5day в Центральной и Восточной Северной Америке, Амазонском бассейне, Южной Африке, Южной, Восточной, Юго-Восточной Азии и Австралии, а также, занижает количества осадков за самый дождливый день в году и за самые дождливые 5 последовательных дней в году в Западной Африке. То есть, INMCM5 завышает интенсивность осадков в очень дождливые дни особенно сильно в тех регионах, где она по данным реанализа ERA-Interim большая.

Для улучшения воспроизведения экстремальных осадков в модели INMCM5 рассматривались добавление в модель и настройка существующих параметризаций следующих физических процессов: испарение выпадающих осадков в верхних слоях атмосферы; перемешивание горизонтальных компонент скорости при крупномасштабной конденсации и глубокой конвекции; сопротивление воздуха, действующее на падающие осадки.

Испарение осадков в верхних слоях атмосферы

В модели INMCM5 осадки формируются в результате баланса двух процессов: перехода облачной влаги в осадки и испарения падающих осадков [8].

Скорость испарения осадков в модельной ячейке определяется по формуле

$$E_p = 5.44 \cdot 10^{-4} (1 - a) (q_{\max} - q) \sqrt{\frac{P \sqrt{p/p_s}}{5.9 \cdot 10^{-3}}}, \quad (1)$$

где a — доля объёма ячейки, занятая облаками, q_{\max} — максимальная удельная влажность при данной температуре в ячейке, q — удельная влажность в ячейке, P — поток осадков сверху ($\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$), p, p_s — давление в ячейке и на поверхности Земли.

При этом E_p не может превышать значения E_p^{\max} , при котором вся вода, выпадающая в виде осадков из облачной влаги, испаряется.

Для оценки влияния испарения в верхних слоях атмосферы на формирование экстремальных осадков зависимость (1) была упрощена до пропорциональной:

$$E_p = K E_p^{\max}, \quad K = \text{const}. \quad (2)$$

Для проверки чувствительности воспроизведения моделью INMCM5 количества осадков за самый дождливый день в году (RX1day) к изменению (2) скорости испарения осадков в верхних слоях атмосферы были проведены два численных эксперимента длительностью три модельных года со значениями $K = 0.2$ и $K = 1$. На рисунках 1с), 1д) показаны отклонения RX1day по данным климатической модели ИВМ РАН с изменённой скоростью испарения при двух разных значениях K от INMCM5 с исходной скоростью испарения, определяемой по формуле (1).

Заметим, что при $K = 0.2$ (рисунок 1с)) происходит как завышение RX1day в Амазонском бассейне, Южной Африке, Восточной Азии, так и его занижение в Центральной Северной Америке, Южной Америке и Южной Азии. В Австралии же достаточное большое завышение осадков за самый дождливый день в году в одних районах компенсируется не менее существенным занижением в других. В целом, можно отметить, что при $K = 0.2$ качество воспроизведения индекса RX1day практически не изменилось.

Рисунок 1d) для $K = 1$ иллюстрирует значительное завышение RX1day в Амазонском бассейне, Южной Африке, Южной и Юго-Восточной Азии и Австралии, то есть именно в тех регионах, где количество осадков за самый дождливый день в году по данным INMCM5 завышено по сравнению с данными реанализа ERA-Interim. Значит, при $K = 1$ положительная ошибка воспроизведения RX1day только увеличилась.

Таким образом, варьирование скорости испарения осадков в верхних слоях атмосферы привело только к увеличению количества осадков за самый дождливый день в году в регионах, где RX1day по данным INMCM5 уже завышен по сравнению с ERA-Interim.

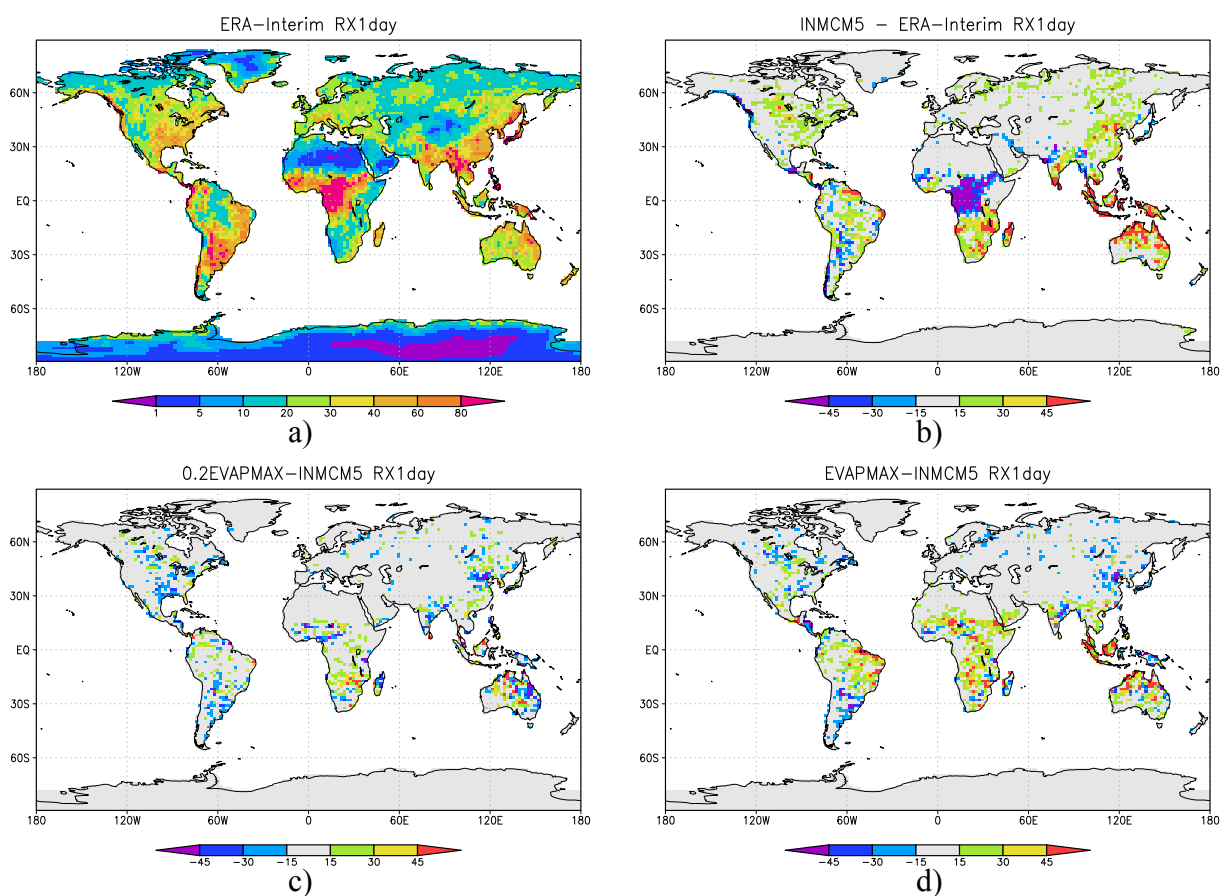


Рис. 1: Отклонения усреднённого по 1979–1981 годам индекса RX1day по данным INMCM5, моделей с $K = 0.2$ и $K = 1$ и данным реанализа ERA-Interim

Перемешивание горизонтальных компонент скорости

Как крупномасштабная конденсация, так и глубокая конвекция вызывают вертикальное движение, которое перераспределяет горизонтальный импульс между близлежащими воздушными слоями.

В модель добавлена реализация перемешивания при крупномасштабной конден-

сации, которое для двух смежных ячеек с номерами k и $k + 1$ производится по формулам:

$$\begin{aligned}\frac{\tilde{\phi}_k - \phi_k}{\Delta t} &= \alpha_{k+1/2}(\phi_{k+1/2}^{\text{avg}} - \phi_k), \\ \frac{\tilde{\phi}_{k+1} - \phi_{k+1}}{\Delta t} &= \alpha_{k+1/2}(\phi_{k+1/2}^{\text{avg}} - \phi_{k+1}),\end{aligned}\tag{3}$$

где ϕ — это каждая из компонент u и v горизонтальной скорости, $\phi_{k+1/2}^{\text{avg}}$ — усреднённое по сигма-координате значение ϕ , $\alpha_{k+1/2} = \min\left(\frac{1}{\Delta t}, A_0 P\right)$ — скорость перемешивания. Скорость перемешивания искусственно ограничивается величиной $\frac{1}{\Delta t}$, чтобы гарантировать численную устойчивость процедуры. Здесь Δt — шаг по времени, P — поток осадков сверху на данном уровне, A_0 — постоянный параметр, выбираемый из диапазона $1 \div 10 \text{ м}^2 \text{кг}^{-1}$.

Аналогично учитывается перемешивание, связанное с глубокой конвекцией, с теми отличиями, что оно производится в области между нижней и верхней границами конвекции, а скорость перемешивания вычисляется по формуле:

$$\beta = \min\left(\frac{1}{\Delta t}, \frac{C_{\text{INC}}}{\tau_{\text{HIG}}} \frac{P_{\text{CV}}}{Q_{\text{TOT}}}\right).$$

где $\tau_{\text{HIG}} = 12 \text{ ч}$ — характерное время конвекции, C_{INC} — постоянный параметр, варьируемый в диапазоне $1 \div 3$, P_{CV} — количество осадков вследствие глубокой конвекции, Q_{TOT} — количество влаги в конвективной области.

Настройка параметра A_0 , отвечающего за перемешивание горизонтальных компонент скорости при крупномасштабной конденсации, реализована путём проведения серии расчётов длительностью три модельных года. По их результатам из интервала (1; 10) выбрано значение $A_0 = 7.5$, минимизирующее среднеквадратичное отклонение от данных реанализа для индексов RX1day и RX5day. Для подбора параметра C_{INC} , влияющего на перемешивание горизонтальных компонент скорости при глубокой конвекции, по данным расчётов при $A_0 = 7.5$ выбрано значение $C_{\text{INC}} = 3$ как оптимальное и максимально возможное, при котором горизонтальные компоненты скорости не претерпевают существенных изменений.

Для краткости, вариант модели INMCM5 с данными изменениями далее будем называть INMCM5VM (INMCM5 Velocities Mixing).

После настройки этих параметров модели был проведён длительный расчёт, по данным которого были вычислены индексы экстремальности. Анализ таблицы 1 показывает, что в модели с вертикальным перемешиванием горизонтальных составляющих скорости качество воспроизведения практически всех температурных индексов экстремальности или немного улучшилось, или не изменилось по сравнению с INMCM5. Исключение составляют годовой минимум максимальной за сутки температуры (TXn), годовой минимум минимальной за сутки температуры (TNn), количество морозных дней (FD) и тропических ночей (TR), продолжительность холодных периодов (CSDI) — воспроизведение этих индексов в INMCM5VM ухудшилось на 5–13% по сравнению с INMCM5.

Таблица 2 показывает, что качество воспроизведения индексов R1mm, R10mm, CWD, RX1day, RX5day и R99p улучшилось в INMCM5VM на 2–10% по сравнению с INMCM5. Однако для индексов R20mm и CDD среднеквадратичное отклонение от данных реанализа увеличилось на 3–5%.

На рисунках 2с), 3с) представлены пространственные распределения отклонений количества осадков за самый дождливый день в году (RX1day) и за самые дождливые 5 последовательных дней в году (RX5day) по данным INMCM5VM от INMCM5.

Рисунок 2с) демонстрирует, что модель с настроенным вертикальным перемешиванием горизонтальных компонент скорости по сравнению с INMCM5 значительно занижает RX1day в Австралии и несколько занижает количество осадков за самый дождливый день в году в Южной Америке, Южной Африке, Южной, Восточной и Юго-Восточной Азии.

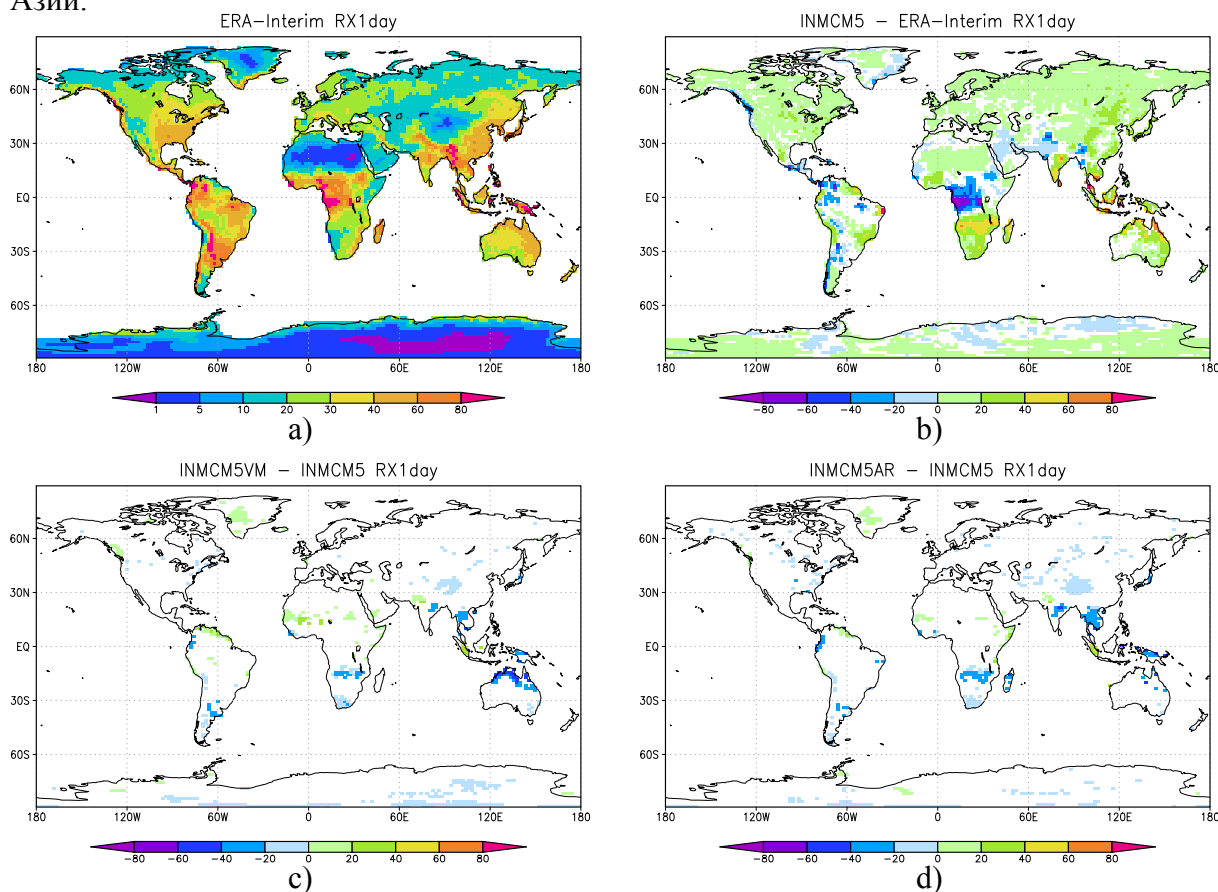


Рис. 2: Отклонения усреднённого по 1981–2010 годам индекса RX1day по данным моделей INMCM5, INMCM5VM, INMCM5AR и данным реанализа ERA-Interim на уровне значимости 1%

Рисунок 3с) показывает, что INMCM5VM по сравнению с INMCM5 значительно занижает RX5day в Восточной Азии и Австралии, а также, несколько занижает количество осадков за самые дождливые 5 последовательных дней в году в Южной Америке, Южной Африке, Южной и Юго-Восточной Азии.

Значит, настройка параметров вертикального перемешивания заметно уменьшает наблюдаемое в INMCM5 завышение RX1day и RX5day в Южной Африке, Восточной Азии и Австралии, и в целом приводит к улучшению качества воспроизведения индексов экстремальности, связанных с количеством осадков в очень дождливые дни и их интенсивностью, хотя и не такому значительному, как необходимо. При этом сохраняется значительное завышение индексов RX1day, RX5day в Амазонском бассейне, Южной и Юго-Восточной Азии, а также, их занижение в Западной Африке.

Сопротивление воздуха

Поскольку частицы осадков (капли воды или кристаллы льда) движутся относительно окружающего воздуха, возникает сила сопротивления, которая увлекает воздух вслед за частицами. Эту силу сопротивления можно включить в правую часть уравнения баланса импульса, входящего в систему уравнений гидротермодинамики атмосферы. В этом случае для определения влияния этой силы на компоненты горизонтальной скорости необходимо решать дополнительное уравнение Пуассона.

С другой стороны, если рассмотреть систему воздух-осадки, то для неё сила сопротивления является внутренней, и вклад в общий импульс системы она не вносит. Формально уравнения гидротермодинамики атмосферы остаются справедливыми, если заменить плотность воздуха на плотность смеси воздух-осадки.

В модели эта добавочная плотность осадков определяется как отношение потока осадков к установившейся скорости их падения:

$$\Delta\rho = \frac{P}{W_{\text{prec}}}.$$

Разброс возможных скоростей падения осадков довольно велик, поэтому в расчёте они фиксировались постоянными значениями, различными для капель воды и кристаллов льда.

Уравнения динамики атмосферы не содержат плотность в явном виде, вместо неё в уравнениях подставлено выражение из уравнения состояния идеального газа:

$$\rho = \frac{p}{RT},$$

таким образом, плотность в уравнениях однозначно определяется температурой. Поэтому в модели перед вычислением решения уравнений динамики атмосферы на очередном шаге производится коррекция температуры на

$$\Delta T = -T \frac{\Delta\rho}{\rho} = -\frac{RT^2}{p} \Delta\rho,$$

а после вычисления решения на этом шаге производится обратная коррекция на то же значение ΔT .

Так как условие

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{\Delta\rho}{\rho}$$

справедливо лишь при небольших $\Delta\rho$, в модели введено ограничение:

$$0 \leq -\frac{\Delta T}{T} \leq 0,05.$$

Такое изменение температуры не вполне корректно: оно заменяет истинную температуру воздуха на подправленную величину, хотя температура в модели влияет на множество процессов. Из-за этого коррекция температуры используется только в уравнениях динамики атмосферы для определения дивергенции горизонтальных компонент скорости.

Для краткости, вариант модели INMCM5 с учётом сопротивления воздуха и вертикальным перемешиванием горизонтальных составляющих скорости далее будем называть INMCM5AR (INMCM5 Air Resistance).

Для проведения длинного расчёта с моделью, учитывающей сопротивление воздуха, действующее на падающие осадки, скорость жидких осадков была выбрана равной

$W_{\text{ж}} = 5$ м/с, а твёрдых — $W_{\text{тв}} = 0.5$ м/с. Выбор скоростей осадков потребовал перенастройки параметров вертикального перемешивания так, что $A_0 = 8$, $C_{\text{INC}} = 2$.

Таблица 1 показывает, что в модели с действующим на падающие осадки сопротивлением воздуха качество воспроизведения практически всех индексов экстремальности, связанных с температурой, на 9–19% ухудшилось по сравнению с INMCM5. Исключение составляют годовой максимум максимальной за сутки температуры (TXx), количество летних дней (SU) и продолжительность жарких периодов (WSDI) — ошибка воспроизведения этих индексов уменьшилась на 5–10%. Причиной увеличения ошибки воспроизведения большей части температурных индексов, вероятно, является способ реализации учёта сопротивления воздуха, производящий не очень аккуратную коррекцию температуры. Эту ошибку можно попытаться уменьшить, выполняя коррекцию температуры только для тех уравнений, где температура и плотность непосредственно связаны уравнением состояния идеального газа.

Таблица 2 показывает, что качество воспроизведения всех индексов экстремальности, связанных с осадками, в INMCM5AR или улучшилось на 3–21% по сравнению с INMCM5, или осталось неизменным.

На рисунках 2д), 3д) представлены пространственные распределения отклонений количества осадков за самый дождливый день в году (RX1day) и за самые дождливые 5 последовательных дней в году (RX5day) по данным INMCM5AR от INMCM5.

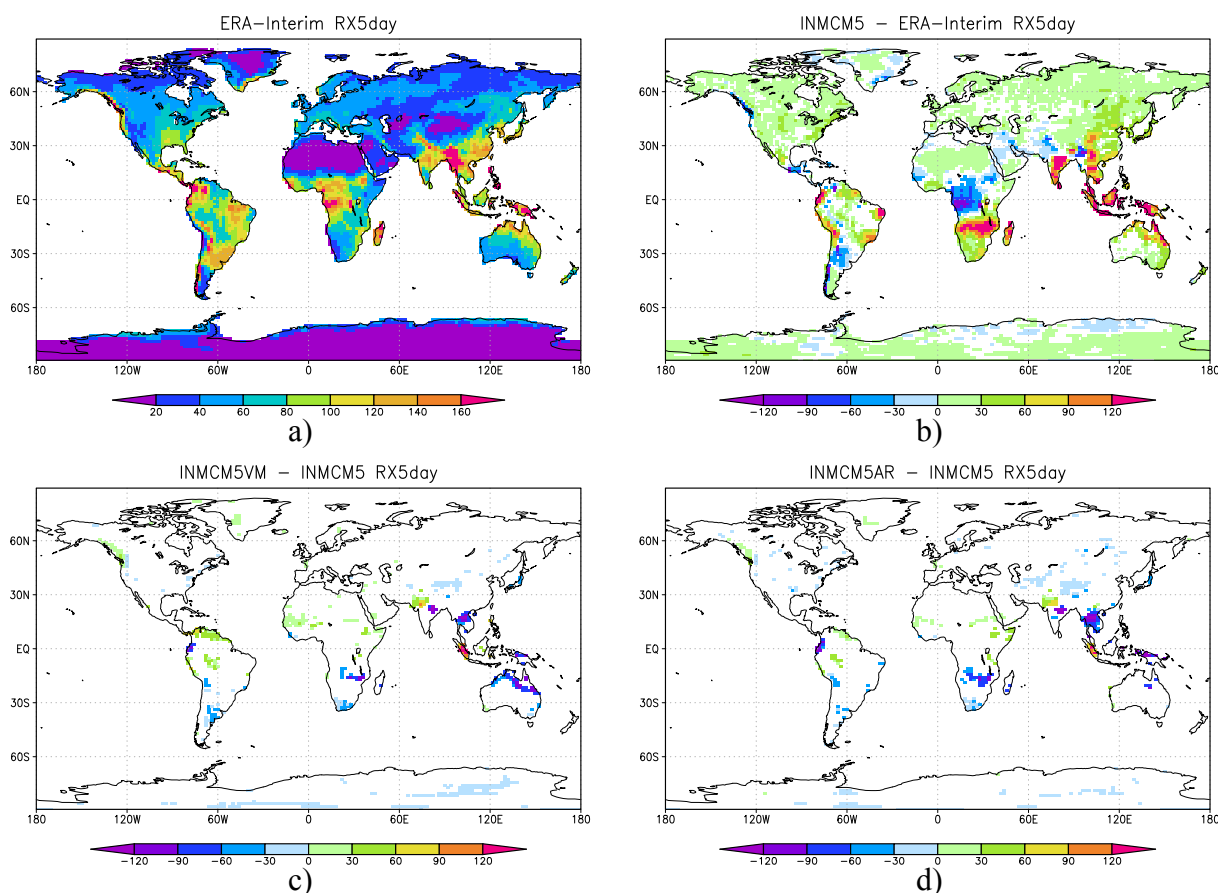


Рис. 3: Отклонения усреднённого по 1981–2010 годам индекса RX5day по данным моделей

INMCM5, INMCM5VM, INMCM5AR и данным реанализа ERA-Interim на уровне значимости 1%

Рисунки 2d), 3d) показывают, что модель с действующим на падающие осадки сопротивлением воздуха по сравнению с INMCM5 значительно занижает RX1day и RX5day в Южной Африке, Южной и Восточной Азии и несколько занижает указанные индексы экстремальности в Тибете.

Таким образом, учёт действующего на падающие осадки сопротивления воздуха значительно уменьшает наблюдаемое в INMCM5 завышение RX1day и RX5day в Южной Африке, Южной и Восточной Азии, и приводит к улучшению качества воспроизведения индексов экстремальности, связанных с количеством осадков в очень дождливые дни и их интенсивностью, на 9–21%. При этом сохраняется значительное завышение индексов RX1day, RX5day в Амазонском бассейне и Юго-Восточной Азии, а также, их занижение в Западной Африке.

Заключение

Для улучшения воспроизведения экстремальных осадков вначале было изучено влияние на них испарения в верхних слоях атмосферы. Попытки увеличить интенсивность испарения привели к перераспределению осадков в область, где модель и так имела завышенные по сравнению с ERA-Interim значения интенсивности экстремальных осадков. В итоге данное изменение отрицательно сказалось на качестве воспроизведения проблемных индексов и не использовалось.

После этого в модели было реализовано вертикальное перемешивание воздушных масс, обусловленное крупномасштабной конденсацией и глубокой конвекцией. Были оптимизированы параметры модели A_0 и C_{INC} , отвечающие за интенсивность данных процессов. Данные изменения позволили добиться улучшения воспроизведения индексов экстремальности, связанных с осадками, на 2–10% по сравнению с INMCM5.

Затем в модель был добавлен учёт сопротивления воздуха, действующего на падающие осадки. Это изменение существенно (на 3–21%) улучшило качество воспроизведения всех осадочных индексов, однако ухудшило воспроизведение некоторых температурных. Ухудшение температурных индексов может быть связано с коррекцией температуры, использующейся как способ ввести в модель добавочную плотность.

В то же время, проведённые изменения не позволили добиться существенного улучшения воспроизведения экстремальных осадков в Юго-Восточной Азии. К особенностям этого региона следует отнести неудовлетворительное разрешение расчётной сеткой. Также нет уверенности в том, что в этой области реанализ ERA-Interim не содержит существенных отклонений от данных наблюдений. Данные вопросы требуют дополнительного исследования с привлечением, возможно, данных других реанализов, более детальных данных наблюдений, подробного анализа гидрологического цикла модели.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы РАН «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования». Авторы выражают благодарность Фадееву Р. Ю. за ценные советы, данные в процессе работы над исследованием.

Список литературы

- [1] *Flato G., Marotzke J., Abiodun B. et al.* Evaluation of climate models. In: Climate Change 2013. The physical Science Basis. — Cambridge University press, 2014.
- [2] *Sillmann J., Kharin V.V., Zhang X. et al.* Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate // *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 2013. — V. 118. — Pp. 1716–1733.
- [3] *Володин Е. М., Дианский Н. А., Гусев А. В.* Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM 4.0 // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*, 2010. — Т. 46 — N. 4. — С. 448–466.
- [4] *Володин Е. М., Мортиков Е. В., Кострыкин С. В. и др.* Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2017. — Т. 53, N. 2. — С. 164–178.
- [5] *Volodin, E. M., Mortikov, E. V., Kostykin S. V. et al.* Simulation of the present day climate with the climate model INMCM5 // *Clim. Dyn.*, 2017. — V. 49. — Pp. 3715–3734.
- [6] *Dee, D.P. et al.* The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // *Quart. Journal. Roy. Meteorol. Soc.*, 2011. — V. 137. — Pp. 553–597.
- [7] *Володин Е. М., Тарасевич М. А.* Воспроизведение индексов погодно-климатической экстремальности климатической моделью ИВМ РАН. // *Метеорология и гидрология*, 2018. — N. 11. — С. 68–76.
- [8] *Володин Е. М.* Представление потоков тепла, влаги и импульса в климатических моделях. Конвекция и конденсация // *Фундаментальная и прикладная климатология*, 2017. — Т. 2. — С. 26–41.