



МОДЕЛИ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ ПРОЕКТА СМIP-6 ДЛЯ ДИАГНОЗА ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГЛОБАЛЬНОГО ВОДООБМЕНА

С.Г. Добровольский¹, В.П. Юшков^{1,2}, И.В. Соломонова¹

¹ ФГБУН Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН),
РФ, Москва, ул. Губкина, 3
E-mail: sgdo@bk.ru

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Физический факультет, РФ, Москва, Ленинские горы, 1 с. 2

Диагностируемые изменения составляющих глобального водообмена рассматриваются как реализации случайных процессов, полученные в результате прогонов различных – от 34 до 43 климатических моделей в рамках «исторических» (за период 1850–2014 гг.) экспериментов проекта СМIP-6. Исследуются вариации: (1) испарения с поверхности океана, (2) осадков над океаном, (3) «эффективного» испарения с океана (разности «испарение минус осадки»), (4) осадков над сушей, (5) испарения (эвапотранспирации) с поверхности суши, (6) «эффективных» осадков над сушей (разности «осадки минус испарение» или «климатического стока»), (7) речного стока.

Ключевые слова: диагноз изменений климата, глобальный водообмен, модели СМIP-6

Поступила в редакцию: 18.05.2023. После доработки: 24.08.2023.

Введение. Несмотря на то, что вопросам изменений в климатической системе в последнее время уделяется повышенное внимание – см., например, обширную библиографию в последнем отчете Международной группы экспертов по изменениям климата (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC [1]) – колебания составляющих водообмена в глобальном пространственном масштабе и в климатических временных масштабах изучены совершенно недостаточно. В существующих публикациях в основном описываются прогностические проекции отдельных элементов глобального водообмена (осадков, речного стока) на протяжении 21 века, а если речь идет о так называемых «исторических» экспериментах проекта СМIP-6 (шестой фазы «Проекта сравнения объединенных моделей», Coupled Model Intercomparison Project), то основное внимание уделяется изменениям термического режима в прошлом и изучению смещенностей в оценке ключевых параметров, возникающих в процессе интегрирования различных моделей.

Целью настоящей работы была попытка диагноза и изучения закономерностей изменений основных составляющих глобального водообмена: испарения с поверхности океана, осадков над океаном, «эффективного испарения» с поверхности океана (разность «испарение минус осадки»), осадков над сушей, испарения (эвапотранспирация) с поверхности суши, «эффективных осадков» над сушей (разность «осадки минус испарение»), речного стока. При этом указанные изменения рассматриваются нами как случайные процессы. Общеизвестным является тот факт, что вариации гидрометеорологических характеристик в климатических масштабах времени являются реализациями случайных функций. Однако анализу межгодовых и многолетних изменений глобального гидрологического цикла при таком подходе препятствует отсутствие теоретически бесконечного – а на практике большого – числа реализаций: для каждого параметра процессов имеется в лучшем случае один ряд наблюдаемых значений (или ряд, полученный в результате реанализа).

В отдельных случаях оценка параметров случайного процесса, описывающего изменения интересующих исследователей параметров, возможна и на основе единственной реализации процесса. Такого рода анализ осуществим в случае, если процесс стационарен и его автокоррелированность по времени невелика – в таком варианте применимы теоремы об эргодичности. Другой вариант оценки параметров процесса по единственной реализации – в случае нестационарного, но «стационаризуемого» процесса – когда n корней характеристического уравнения авторегрессии лежат на единичной окружности в комплексной плоскости, а все другие корни лежат вне окружности. В таком случае взятие n -ой разности исходного ряда приводит к стационарному процессу, и при условии его небольшой автокоррелированности оценка параметров всего случайного процесса может дать достоверные результаты. Простейшим вариантом в последнем случае является дискретный винеровский процесс, то есть, дискретный вариант случайного блуждания, при котором первое приращение процесса является белым шумом (последовательностью одинаково распределенных независимых случайных величин с нулевым математическим ожиданием). В известных работах К. Хасельманна и его соавторов [2, 3] было показано, что такого рода модель подходит в первом приближении для описания естественных климатических изменений глобальной температуры в масштабах времени от, так называемого, «промежуточного» климатического масштаба вплоть до тысяч лет.

Однако, уже предварительное рассмотрение изменений в глобальном гидрологическом цикле, в том числе, осуществленном в предыдущих работах авторов [4–6], показывает, что изменения составляющих водообмена не описываются двумя указанными выше типами моделей. Принципиальное препятствие при оценке параметров процессов в этом случае – отсутствие большого числа реализаций – обходится в настоящей работе следующим способом. Как известно,

«большие» модели климатической системы (они же «coupled models» или «климатические модели общей циркуляции атмосферы»), не воспроизводят реальные фазы процессов синоптических масштабов в атмосфере; из-за этого, даже будучи интегрируемы при абсолютно одинаковых начальных и граничных условиях, траектории различных моделей климата быстро «расходятся». Набор большого числа таких, существенно отличающихся друг от друга, траекторий можно, в первом приближении, считать набором реализаций того случайного процесса, который описывает поведение составляющих глобального водообмена.

Указанный подход позволяет решить несколько важнейших проблем исследования глобального гидрологического цикла. Осреднение большого количества реализаций изменений параметров основных составляющих водообмена (то есть, оценка изменений математического ожидания) позволяет отфильтровать составляющие типа «погодного возбуждения» по К. Хасельманну, приводящие к колебаниям типа случайного блуждания, а также отфильтровать ряд других, внутренних по отношению к климатической системе, «шумов». При этом более четко выявляется воздействие на водообмен внешних по отношению к климатической системе факторов – прежде всего, антропогенных изменений глобальной температуры и взрывных вулканических извержений. Тем самым становится возможным изучить роль различных звеньев глобального водообмена в преобразовании предыдущих звеньев, приводящем к изменению степени их стационарности в разных масштабах времени и к изменению сравнительной роли внешних факторов процессов.

Таким образом, предлагаемое исследование поможет в целом представить механизм функционирования глобального гидрологического цикла в климатических масштабах времени (от межгодового до векового), как представляется, не понятый в основных своих чертах вплоть до настоящего времени.

Материалы и методы. Детали использования результатов моделей проек-

та CMIP-6 заключаются в следующем. Проект CMIP-6 [7] объединяет множество как глобальных, так и региональных гидродинамических моделей. Из этого ансамбля моделей нами были рассмотрены лишь те глобальные модели, результаты (поля) которых представлены для общего пользования, то есть, имеющие на сайтах (нодах) проекта ESGF (Earth System Grid Federation) [8], данные о глобальном поле испарения/эвапотранспирации, осадках (общего типа) и общем стоке.

Так как сам проект CMIP-6 не задает жестких рамок и правил, лишь 48 глобальных моделей предоставили эти поля на сегодняшний день. В дальнейшем возможно расширение этих данных и поступление сведений от других моделей.

Результаты численного моделирования приходилось интерполировать, поскольку разные модели используют разные расчетные сетки: «гауссова», «географическая» («lonlat») или «криволинейная» («curvilinear»). Интерполяция различных модельных глобальных полей осуществлялась на единую гауссову сетку T62 с треугольным усечением. Ее характерное разрешение $2^\circ \times 1,7^\circ$. Более плотные сетки для интерполяции были использованы ранее для работы над другими статьями авторов, например, [5].

Результаты тестовых экспериментов с интерполяцией данных на маску T255 или T254 (с разрешением примерно $0,5^\circ$) не изменяют существенно полученные результаты (средние глобальные значения), но намного увеличивают время множественных расчетов. Для интерполяции, выборки, интегрирования по поверхностям суши и океана использовался пакет программ CDO Немецкого метеорологического института им. Макса Планка [9, 10], весьма удобный для быстрой пакетной обработки результатов численного моделирования и рекомендованный американской университетской корпорацией атмосферных исследований [11].

В конечном итоге для анализа в расчетах использовались данные всех до-

ступных моделей климата проекта CMIP-6, для которых удалось обобщить информацию, полученную в результате «исторических экспериментов» по составляющим водообмена. Набор параметров, для которых были доступны данные исторических экспериментов, несколько различался. Кроме того, несколько моделей были исключены из рассмотрения после анализа результатов, так как они давали кардинально отличающиеся от остальных моделей оценки. Формальным критерием для отбрасывания очень немногих, одной-двух моделей, был выход средних оценок составляющих глобального водообмена за «три сигмы» разброса оценок, полученных на основной массе моделей.

Наконец, при сопоставлении ансамблевых оценок по различным параметрам, а также для оценки расчетных параметров необходимы были наборы моделей, по которым имелись результаты в отношении всех требуемых комбинаций параметров. Так, для оценки изменений годовых величин испарения с поверхности океана использовались результаты 41 модели, для оценки изменений осадков над океаном и «эффективного» испарения с океана (разности «испарение минус осадки») 40 моделей, годовых осадков над сушей, испарения (эвапотранспирации) с поверхности суши и эффективных осадков над сушей (климатического стока) 43 моделей, слоя речного стока с суши 34 модели.

Во всех случаях использовались данные «исторических экспериментов» за одинаковый промежуток времени: с 1850 по 2014 г., всего 165 лет. Для всех моделей скачивались также месячные данные по каждому из параметров, однако в связи с ограниченностью объема статьи в нее не включены результаты этого анализа.

Для расчетов среднего, максимального и минимального стоков использовались результаты моделирования с месячным осреднением, которые загружались с сайта PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Interpretation [12]).

Как указывалось во Введении, несмотря на то, что в работе изучаются

временные ряды каждой интересующей нас характеристики, полученные на детерминистических гидродинамических моделях, совокупность генерируемых всеми моделями рядов этой характеристики удобно рассматривать в качестве реализаций единого случайного процесса. Таким образом, реализации указанного случайного процесса и их функционалы (в частности, осредненные по всем моделям ряды годовых приращений и др.) целесообразно исследовать при помощи методов стохастического анализа.

Принципиальную роль в анализе играет решение вопроса о том, является ли генерирующая ряд последовательность стационарной или нестационарной. В любом случае исследование наличия и степени нестационарности неизбежно осуществляется путем деления имеющегося временного ряда на сегменты, которые, в свою очередь, предполагаются отрезками реализаций стационарных процессов.

Авторами была предложена новая система статистического и стохастического анализа сегментов реализаций стационарных случайных последовательностей, приводящая, в том числе, к решению вопроса о степени нестационарности изучаемых рядов и основанная на принципах теории случайных функций (см., например, [13–16]). Так как имеющиеся ряды, тем более их сегменты, сравнительно коротки, возникает задача получения оценок параметров стохастических моделей, превосходящих по точности, обычно используемые методы.

Варианты методов анализа временных рядов подробно описаны в работах [4–6]. Вкратце напомним их суть. В связи с тем, что теория случайных функций и ее приложения дают наиболее адекватные результаты в случае гауссовского характера изучаемых сегментов, целесообразно преобразовывать исходные сегменты рядов в сегменты выборочных значений нормально распределенных величин (такого рода анализ дублировался авторами анализом рядов в их исходном виде). С этой целью авторами был предложен новый алгоритм соответствующего пересчета, который оказался

намного более эффективным, чем широко распространенные алгоритмы такого плана – например, алгоритм Вычислительного центра РАН (ВЦ РАН). В частности, проверка на 1 миллионе сгенерированных равномерно распределенных (то есть, максимально отличающихся от гауссовских) псевдослучайных чисел показывает, что среднее значение (то есть, смещенность) полученных нашим методом чисел равно 0,001734, что по модулю на порядок меньше, чем при использовании алгоритма ВЦ РАН. Стандарт оказался равен единице с точностью до шестого знака после запятой (ошибка, по крайней мере, на 4,5 порядка меньше), асимметрия $-0,029977$ (в 5 с лишним раз лучше, по модулю, чем с применением алгоритма ВЦ РАН).

Другой важной предпосылкой для создания новых формул послужил предложенный авторами новый экономичный метод генерирования последовательностей независимых псевдослучайных гауссовских чисел, обладающий лучшими свойствами по сравнению с имеющимися аналогичными методами. В его основе была заложена идея зеркально-симметричного удвоения (ЗСУ) генерирующего алгоритма, автоматически устраняющая асимметрию получаемых чисел, приводящая к нулю математическое ожидание (то есть, приводящая к нулю смещенность) и позволяющая с любой точностью получать единичную дисперсию.

Предложенный метод ЗСУ опробовался нами с использованием упомянувшегося выше алгоритма Вычислительного центра РАН и числовой встроенной функции генерирования псевдослучайных равномерно распределенных чисел. Он также показал свою эффективность по сравнению с алгоритмом ВЦ РАН (подробнее см. [4]).

В связи с тем, что сегменты изучаемых рядов мы рассматриваем как сегменты реализаций стационарных случайных процессов, для их анализа в работе использован метод наибольшей энтропии. В классической работе [17] было показано, что максимизация энтропии, порождаемой отсутствующей информа-

цией (отсутствующими частями анализируемых реализаций, предполагаемых бесконечными в теории случайных функций) и минимизация энтропии, порождаемой имеющейся информацией, приводит к оптимальному представлению рядов в виде отрезков реализаций процессов авторегрессии конечного порядка.

На основе предложенного авторами нового алгоритма генерирования гауссовских псевдослучайных величин и нового алгоритма пересчета исходных рядов в ряды выборочных значений нормально распределенных величин [4] методом Монте-Карло были получены новые формулы для оценок статистических и стохастических параметров рядов.

Для изучения вопроса о стационарности изменений стока были предложены новые двусторонние критерии – раздельно для стационарности/нестационарности по среднему значению (математическому ожиданию, $M_{\text{выб}}$), стандарту (среднеквадратичному отклонению, $\sigma_{\text{выб}}$), автокоррелированности, $r_{\text{выб}}$. Указанные критерии основывались на оценке стандартов разностей между выборочными средними значениями указанных параметров для первой и второй половин рядов (длиной не менее 40 лет), соответственно, каждая из которых предполагается отрезком реализации стационарного процесса. Формулы для них были получены путем построения, несколькими методами, трехмерных поверхностей зависимостей искомых величин от специально подобранных функционалов ключевых параметров и последующей аппроксимации этих поверхностей многочленами второго порядка. Так, формула для стандарта приращений средних значений выглядит следующим образом:

$$\sigma(M_{\text{выб}}^{2,МК} - M_{\text{выб}}^{1,МК}) = 0,07 + \frac{15,3279 - 12,1355 * \lg(1 - r_1)}{N} - \frac{239,147}{N^2} - \lg(1 - r_1)[0,3702 + 0,0011 \lg(1 - r_1)], \quad (1)$$

где N – длина ряда (в безразмерных единицах), r_1 – коррелированность смежных членов ряда (коэффициент автокорреляции с единичным сдвигом по времени).

На основе формулы (1) и аналогичных ей рассчитывались значения соответствующих критериев стационарности/нестационарности рядов, пересчитанных в выборочные значения гауссовских случайных величин: по математическому ожиданию, I_{SM} , по стандартам (дисперсиям), I_{SS} , по автокоррелированности, I_{sr} . Так, формула для I_{SM} выглядит следующим образом

$$I_{SM} = \frac{M_{\text{выб}}^2 - M_{\text{выб}}^1}{\sigma(M_{\text{выб}}^{2,МК} - M_{\text{выб}}^{1,МК})}, \quad (2)$$

где $M_{\text{выб}}^2 - M_{\text{выб}}^1$ – разность между выборочными средними значениями второй и первой половин ряда стока, вычисляемыми по обычным формулам; $\sigma(M_{\text{выб}}^{2,МК} - M_{\text{выб}}^{1,МК})$ – стандарт аналогичной разности, оцененный методом Монте-Карло для стационарной последовательности соответствующей длины и временной коррелированности – и аппроксимированный аналитическим выражением (1).

Можно показать, что для стационарных процессов критерий I_{SM} распределен нормально, с единичным стандартом. Таким образом, если расчет критерия по реальным рядам дают его значения, существенно превышающие по модулю единичные, это может служить основанием для предположения о нестационарности процессов по среднему.

Полученные результаты. Для того чтобы получить представление о количественных характеристиках изменений средних значений составляющих глобального водообмена, порядка немногих десятков лет, были рассчитаны изменения во времени индексов стационарности по математическим ожиданиям I_{SM} . Таким способом, оценивая статистическую значимость степени стационарности/нестационарности изменений во всех звеньях глобального гидрологического цикла, можно попытаться получить ответы на следующие важные вопросы.

- Есть ли общее между изменениями во времени *всех* составляющих глобального гидрологического цикла?

- Какова сравнительная роль в этих изменениях основных внешних, по отношению к климатической системе, факторов – взрывных вулканических извержений и антропогенного поступления в атмосферу парниковых газов – и как воздействие этих факторов меняется во времени?

- Каковы различия, между составляющими глобального водообмена, в отношении значимости воздействия внешних сигналов?

- Каким образом различные звенья глобального гидрологического цикла преобразуют нестационарности в изменениях предыдущих звеньев?

На рис. 1 показаны графики изменений во времени индекса стационарности/нестационарности I_{SM} для всех звеньев глобального гидрологического цикла. Так как статистические и стохастические параметры оцениваются в данном случае по 20-летним сегментам рядов, графики построены в виде полос (или «лент») шириной 20 лет. Значения на вертикальной шкале по существу указывают на то, насколько значимо среднее значение 20-летнего сегмента отличается от среднего значения предыдущего сегмента в сравнении с ситуацией абсолютно стационарного ряда (с учетом возможной автокоррелированности на протяжении этих двух сегментов). Напомним, что единичные по модулю значения индекса I_{SM} соответствуют его среднеквадратичным значениям для абсолютно стационарного, по матожиданиям, процесса, а плотность вероятности индекса соответствует нормальной.

Рассмотрение графиков на рис. 1 показывает, прежде всего, что экстремумы на всех графиках приходятся примерно на одни и те же периоды времени. Последняя треть 19-го века для всех составляющих водообмена характеризуется уменьшением значений. Период с 1910-х вплоть до первой половины 1940-х годов отличается ростом всех составляющих гидрологического цикла. Напротив, 1950-е–1970-е годы отличаются падением интенсивности водообмена, а последние десятилетия – его рез-

ким усилением. Отметим при этом, что не все экстремумы в величинах нестационарностей и не для каждой составляющей водообмена статистически значимы.

Очевидно также, что в любом случае поведение процессов в периоды между экстремумами индекса I_{SM} можно рассматривать как условно стационарное. Налицо, следовательно, эффект, который авторы в предыдущих работах, на основе изучения различных гидрометеорологических процессов назвали «перемежающейся нестационарностью» и который заключается в том, что периоды времени со статистически значимыми трендами в положительную и отрицательную сторону чередуются с периодами стационарного режима.

Рассмотрение графиков на рис. 1 также показывает, что вплоть до, примерно, последней четверти 20-го века антропогенный «парниковый» эффект не мог бы давать последовательное уменьшение, увеличение и снова уменьшение интенсивности глобального водообмена – так как естественно было бы ожидать монотонного результата воздействия этого эффекта на гидрологический цикл. Предположительно, значительные уменьшения интенсивности влагооборота были вызваны сериями взрывных вулканических извержений. И, наоборот, резкое увеличение значений всех параметров влагообмена в последние десятилетия могло быть связано с парниковым эффектом, воздействие которого было тем более заметно, что последовало после одного из самых больших в истории человечества извержения вулкана Пинатубо в 1991 г. На рис. 1а показаны также даты других наиболее значительных извержений вулканов 19 и 20 веков. Можно заметить, что в целом периоды интенсификации вулканической активности совпадали с периодами уменьшения интенсивности глобального гидрологического цикла. Некоторое несовпадение минимумов индекса I_{SM} с периодами извержений связано с тем, что графики индекса подвергались значительному сглаживанию методом пространственно взвешенных наименьших средних квадратов.

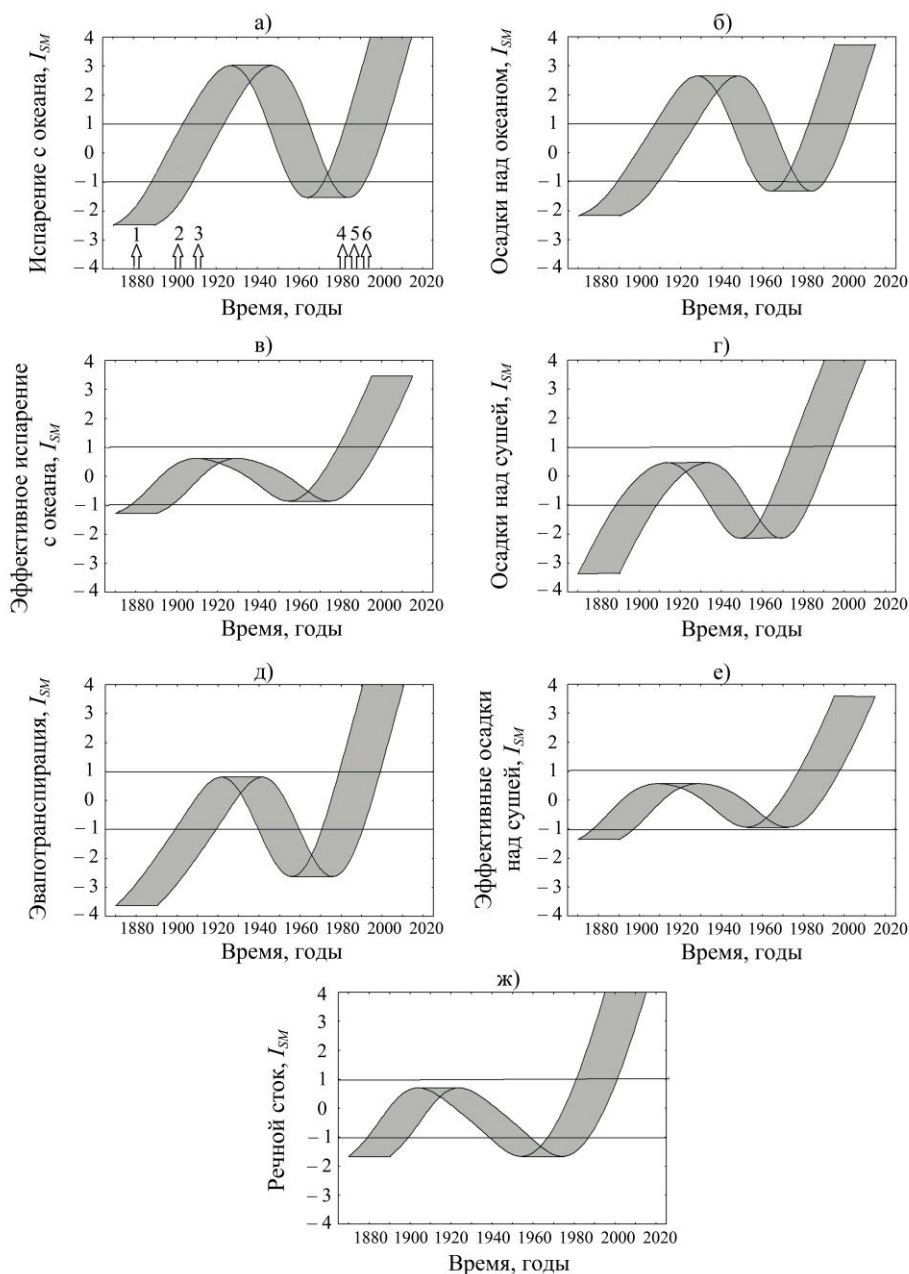


Рис. 1. Изменения во времени индексов стационарности по среднему I_{SM} составляющих глобального водообмена, рассчитанные по результатам «исторических» экспериментов на моделях проекта CMIP-6: *a* – испарение с поверхности океана, *б* – осадки над океаном, *в* – «эффективное испарение» с поверхности океана (разность «испарение минус осадки»), *г* – осадки над сушей, *д* – испарение (эвапотранспирация) с поверхности суши, *е* – «эффективные осадки» над сушей (разность «осадки минус испарение»), *ж* – речной сток. Стрелками отмечены даты крупнейших взрывных вулканических извержений 19 и 20 веков: 1 – Кракатау (1883), 2 – Санта-Мария (1902), 3 – Новарупта (1912), 4 – Эль-Чичон (1982), 5 – Невадо дель Руис (1985), 6 – Пинатубо (1991)

Fig. 1. Changes of the «stationarity index» I_{SM} of the global exchange components. Calculated using the results of the CMIP-6 «historical experiments». *a* – evaporation from the ocean surface, *б* – precipitation over the ocean, *в* – «effective» evaporation from the ocean (evaporation minus precipitation), *г* – precipitation over the land, *д* – evapotranspiration from the land surface, *е* – «effective» precipitation over the land (precipitation minus evaporation), *ж* – river runoff. Arrows denote dates the of greatest explosive volcano eruptions of the 19th and 20th centuries: 1 – Krakatoa (1883), 2 – Santa Maria (1902), 3 – Novarupta (1912), 4 – El Chichon (1982), 5 – Nevado del Ruiz (1985), 6 – Pinatubo (1991).

На исходных, осредненных по всем моделям графиках изменений во времени составляющих глобального водообмена наблюдается абсолютное совпадение локальных минимумов с датами крупнейших извержений. Наиболее очевидно это совпадение для извержений Кракатау в 1883 и Пинатубо в 1991 годах.

Отличительной чертой графиков на рис. 1 является почти абсолютное сходство динамики индекса I_{SM} для следующих пар: испарение с океана – осадки над океаном; осадки над сушей – испарение (эвапотранспирация) с суши; эффективное испарение с океана – эффективные осадки над сушей. К графикам последней пары примыкает и сходный с ними график для речного стока. Для первой из указанных пар процессов характерно статистически значимое нестационарное ослабление водообмена на протяжении последней трети 19-го века и последующий рост к 1940-м годам, при этом не наблюдается выходящего за пределы стационарности последующего уменьшения потоков. Для пары «осадки над сушей–испарение с суши» диагностируется значимое уменьшение потоков влаги не только в последней трети 19-го века, но и в 1950-х – 1970-х годах – при отсутствии значимого подъема в 1910-х – 1940-х годах. Наконец, все изменения таких составляющих водообмена, как эффективное испарение с океана, эффективные осадки над сушей и речной сток – вплоть до последних нескольких десятилетий – соответствуют модели стационарного процесса, а периоды роста и падения, хоть и соответствуют зрительно аналогичным периодам для других звеньев гидрологического цикла, характеризуются статистической незначимостью этих трендов. Важно отметить, что кардинальной чертой *всех* изучаемых процессов является чрезвычайное увеличение интенсивности водообмена на протяжении последних десятилетий.

В целом картину изменений глобального водообмена в масштабах немногих десятилетий можно подытожить следующим образом. Осадки над океаном эффективно подавляют нестационарности в изменениях испарения с океана, преоб-

разуя его в «эффективное испарение» на протяжении большей части исследуемого периода, но не могут ослабить рост водообмена на протяжении последних десятилетий, возможно вызванный парниковым эффектом. Аналогичную стационаризирующую роль в отношении изменений в масштабах времени порядка десятилетий, играет испарение (эвапотранспирация) с поверхности суши в преобразовании осадков над сушей в климатический и актуальный речной сток. Однако и этот механизм не может подавить очень значительный рост потоков влаги в последние десятилетия.

Заключение. Сделаны следующие выводы по исследованию:

- Модельные осадки над океаном в среднем играют стационаризирующую (на протяжении большей части исследуемого периода) роль в отношении испарения с поверхности океана, переводя этот процесс в «эффективное испарение».

- В последующих звеньях глобального гидрологического цикла процесс испарения (эвапотранспирации) с поверхности суши в среднем играет аналогичную стационаризирующую роль в отношении осадков над сушей, преобразуя их в существенно более стационарные изменения «эффективных осадков» и, в конечном итоге, в речной сток.

- Несмотря на то, что хронологически периоды интенсификации и ослабления потоков влаги в различных звеньях глобального гидрологического цикла, в общем, совпадают, значимость этих изменений неодинакова для различных составляющих водообмена и для различных отрезков времени.

- На протяжении большей части рассматриваемого полуторавекового периода, вплоть до, примерно, последней четверти 20-го века, изменения всех составляющих глобального водообмена характеризуются чередованием разнонаправленных трендов и стационарных сегментов. Такое поведение невозможно объяснить с привлечением гипотезы о монотонном росте парниковых газов в атмосфере как основном факторе изме-

нений. Не исключено, что причиной такого рода «перемежающей нестационарности» глобального гидрологического цикла может быть второй, из двух основных, тип внешних по отношению к климатической системе процессов – взрывные вулканические извержения.

- Значимость указанных, чередующихся трендов с середины 19-го века вплоть до последней четверти 20-го века наиболее велика для изменений испарения с океана и с поверхности суши и для осадков над океаном и над сушей. В то же время, механизмы преобразования испарения с океана в «эффективное испарение» и осадков над сушей в «эффективные осадки» подавляют в этих «эффективных» вариантах составляющих водообмена все тренды масштабов времени порядка немногих десятков лет.

- Наконец, для изменений всех составляющих глобального водообмена на протяжении последних десятилетий (примерно с середины 1970-х годов) характерно уникальное по своей значимости увеличение интенсивности. Естественно предположить связь этих процессов с наиболее значительным повышением глобальной температуры именно в этот период – вследствие, предположительно, антропогенного парникового эффекта.

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 23-27-00114.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2022, 63 p.
2. Hasselmann K. Stochastic climate models. Part I. Theory // *Tellus*. 1976. Vol. 28. P. 473–485.
3. Lemke P. Stochastic climate models. Part III. Application to zonally averaged energy models // *Tellus*. 1977. Vol. 29. № 5. P. 385–392.
4. Добровольский С.Г. Глобальная гидрология. Процессы и прогнозы. М.: Геос, 2017. 526 с.
5. Добровольский С.Г., Татаринovic Е.В., Юшков В.П. Сток важнейших рек России и его изменчивость в климатических моделях проекта CMIP-5 // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 12. С. 44–62.
6. Dobrovolski S.G, Yushkov V.P., Istomina M.N. Statistical Modeling of the Global River Runoff Using GCMs: Comparison with the Observational Data and Reanalysis Results // *Water Resources*. 2019. Vol. 46. Suppl. 2. P. S17–S24.
7. World Climate Research Programme (WCRP). URL: <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6> (дата обращения: 03.02.2021).
8. Earth System Grid Federation (ESGF). URL: <https://esgf-data.dkrz.de/> (дата обращения: 03.02.2021).
9. Max Planck Institute fur Meteorology (MPI-M). Climate Data Operators. URL: <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo> (дата обращения: 03.02.2021).
10. Climate Data Operators. User's Guide. Ver. 1.6.1. URL: <http://code.zmaw.de/projects/cdo/> (дата обращения: 03.02.2021).
11. UCAR Community Programs. URL: <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/software.html> (дата обращения: 03.02.2021).
12. PCMDI: Program for Climate Model. Diagnosis and Interpretation. URL: <http://pcmdi9.llnl.gov/> (дата обращения: 03.02.2021).
13. Яглом А.М. Введение в теорию стационарных случайных функций // *Успехи математических наук*. 1952. Т. 7. Вып. 5 (51). С. 3–168.
14. Яглом А.М. Корреляционная теория

рия стационарных случайных функций. С примерами из метеорологии. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 280 с.

15. *Yaglom A.M.* An introduction to the theory of stationary random functions. N.Y.: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1962. 235 p.

16. *Yaglom A.M.* Correlation theory of

stationary and related random functions. Berlin: Springer, 1987. Vol. 1. Basic results. 526 p.

17. *Ulrych T.J., Bishop T.* Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1975. Vol. 13. P. 183–200.

CMIP-6 GENERAL CIRCULATION MODELS FOR DIAGNOSING CHANGES IN CLIMATIC PARAMETERS OF THE GLOBAL WATER EXCHANGE PROCESS

S.G. Dobrovolski¹, V.P. Yushkov^{1,2}, I.V. Solomonova¹

¹FSBIS Water Problems Institute Russian Academy of Sciences (WPI RAS), RF, Moscow, Gubkina St., 3

E-mail: sgdo@bk.ru

²Moscow State University M.V. Lomonosov, Faculty of Physics, RF, Moscow, Leninskiye Gory, 1 b. 2

The diagnosed changes in the components of the global water exchange are considered as realizations of random processes obtained as a result of runs of various, from 34 to 43, climatic models within the framework of the «historical» (1850-2014) experiments of the CMIP-6 project. The following variations are investigated: (1) evaporation from the ocean surface, (2) precipitation over the ocean, (3) «effective» evaporation from the ocean («evaporation minus precipitation»), (4) precipitation over land, (5) evapotranspiration from the land, (6) «effective» precipitation over land («precipitation minus evaporation» or «climatic runoff»), (7) river runoff.

Keywords: climate change diagnosis, global water exchange, CMIP-6 models.

REFERENCES

1. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2022, 63 p.

2. *Hasselmann K.* Stochastic climate models. Part I. Theory. *Tellus*, 1976, Vol. 28, pp. 473–485.

3. *Lemke P.* Stochastic climate models. Part III. Application to zonally averaged energy models. *Tellus*, 1977, V. 29, No. 5, pp. 385–392.

4. *Dobrovol'skiy S.G.* Global'naya gidrologiya. Protsessy i prognozy (Global hydrology. Processes and forecasts). Moscow: Geos, 2017, 526 p.

5. *Dobrovol'skiy S.G., Tatarinovich Ye.V., and Yushkov V.P.* Stok vazhneyshikh rek Rossii i yego izmenchivost' v klimaticheskikh modelyakh proyekta CMIP-5 (The runoff of the most important rivers in Russia and its variability in the climate models of the CMIP-5 project). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2016, No. 12, pp. 44–62.

6. *Dobrovolski S.G., Yushkov V.P., and Istomina M.N.* Statistical Modeling of the Global River Runoff Using GCMs: Comparison with the Observational Data and Reanalysis Results. *Water Resources*, 2019, Vol. 46, Suppl. 2, pp. S17–S24.

7. World Climate Research Programme (WCRP). Available at: URL: <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6> (03.02. 2021).

8. Earth System Grid Federation (ESGF). Available at: URL: <https://esgf-data.dkrz.de/>

(03.02.2021).

9. Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M). Climate Data Operators. Available at: URL:<https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo> (03.02.2021).

10. Climate Data Operators. User's Guide. Ver. 1.6.1. Available at: URL:<http://code.zmaw.de/projects/cdo/> (03.02.2021).

11. UCAR Community Programs. Available at: URL: <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/software.html> (03.02.2021).

12. PCMDI: Program for Climate Model. Diagnosis and Interpretation. Available at: URL:<http://pcmdi9.llnl.gov/> (03.02.2021).

13. *Yaglom A.M.* Vvedeniye v teoriyu statsionarnykh sluchaynykh funktsiy (Introduction to the theory of stationary random functions). *Uspekhi matematicheskikh nauk*, 1952, Vol. 7, Is. 5 (51), pp. 3–168.

14. *Yaglom A.M.* Korrelyatsionnaya teoriya statsionarnykh sluchaynykh funktsiy. S prime-rami iz meteorologii (Correlation theory of stationary random functions. With examples from meteorology). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981, 280 p.

15. *Yaglom A.M.* An introduction to the theory of stationary random functions. N.Y.: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1962, 235 p.

16. *Yaglom A.M.* Correlation theory of stationary and related random functions. Berlin: Springer, 1987, Vol. 1, Basic results, 526 p.

17. *Ulrych T.J. and Bishop T.* Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition. *Rev. Geophys. Space Phys*, 1975, Vol. 13, pp. 183–200.