

УДК 504, 556

## ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГЛОБАЛЬНОГО ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА

С. Г. Добровольский<sup>1)</sup>, В. П. Юшков<sup>1), 2)</sup>, И. В. Соломонова<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>ФГБУН Институт водных проблем Российской академии наук  
(ИВП РАН), ул. Губкина, 3, 119333, г. Москва, РФ, [sgdo@bk.ru](mailto:sgdo@bk.ru);

<sup>2)</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,  
Физический факультет, Ленинские горы, 1 с. 2, 119991, ГСП-1, г. Москва, РФ

Исследованы вариации испарения с поверхности океана, эффективного испарения с океана, суммарного модельного речного стока с материков по данным «исторических» экспериментов климатических моделей проекта CMIP-6. Показано, что модельные осадки над океаном и эвапотранспирация с поверхности суши оказывают стационаризирующее воздействие на гидрологический цикл суши, в том числе на многолетние изменения глобального речного стока.

**Ключевые слова:** диагноз изменений климата; глобальный гидрологический цикл; модели CMIP-6.

## CHANGES IN CLIMATIC PARAMETERS OF GLOBAL HYDROLOGICAL CYCLE

S. G. Dobrovolski<sup>1)</sup>, V. P. Yushkov<sup>1), 2)</sup>, I. V. Solomonova<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>FSBIS Water Problems Institute Russian Academy of Sciences (WPI RAS), Gubkina St., 3, 119333, Moscow, RF, [sgdo@bk.ru](mailto:sgdo@bk.ru) <sup>2)</sup>Moscow State University M. V. Lomonosov, Faculty of Physics, Leninskiye Gory, 1 b. 2, 119991, GCP-1 Moscow, RF

Variations in evaporation from the ocean surface, effective evaporation from the ocean, and total model river runoff from the continents are studied based on data from “historical” experiments of climate models of the CMIP-6 project. It is shown that model precipitation over the ocean and evapotranspiration from the surface of the earth has a stationary effect on the hydrological cycle of the earth, including long-term changes in global river flow.

**Keywords:** climate change diagnosis, global hydrological cycle, CMIP-6 models.

**Введение.** На сегодняшний день в гидрологии остается неисследованной следующая важнейшая проблема: почему при несомненном росте глобальной температуры воздуха за последние 100-150 лет и кажущемся неизбежным соответствующем росте испарения с океана и интенсификации всего глобального водообмена, значительного увеличения стока большинства рек мира не наблюдается?

В работах [1, 2] показано, что только в 4 % створов наблюдаются статистически значимые монотонные многолетние тренды речного стока. Аналогичные выводы делаются во многих посвященных этому вопросу работах, например, авторами фундаментальной монографии [3, с. 131] сделан вывод о том, что «значимых трендов водных ресурсов рассматриваемых речных бассейнов и бассейнов морей не существует».

Определенные общие закономерности изменений компонентов глобального водообмена могут быть получены при помощи трактовки результатов расчетов на детальных гидродинамических моделях климатической системы («климатических моделях»), описывающих большое количество процессов в океане, атмосфере и на поверхности суши (например, проект СМIP). Важным преимуществом экспериментов СМIP является то, что ансамбль моделей — в отличие от инструментальных наблюдений и данных реанализа — позволяет воспроизводить большое количество различных «реализаций» эволюции климатической системы.

*Материалы и методы.* Проанализированы полученные в результате «исторических» экспериментов на 41 модели проекта СМIP-6 [4] многолетние, длиной до 165 лет (1850-2014 гг.), ряды глобально осредненных величин испарения над океаном, «эффективного» испарения с океана (разности «испарение минус осадки»), годового слоя стока. Для сопоставления используемых моделей между собой проведена интерполяция различных модельных глобальных полей на единую гауссову сетку Т62 с треугольным усечением и разрешением  $2 \times 1.7^\circ$ . Для интерполяции, выборки, интегрирования по поверхностям суши и океана использовался пакет программ CDO Немецкого метеорологического института им. Макса Планка [5]. Для расчетов среднего стока использовались результаты моделирования с месячным осреднением, которые загружались с сайта PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Interpretation) [6].

Для того, чтобы получить представление о количественных характеристиках изменений средних значений составляющих глобального водообмена, в работе использовалась новая система статистических и стохастических оценок, предложенная одним из авторов [1, 2, 7, 8], основанная на рекомендациях, следующих из фундаментальных работ по теории случайных функций. На ее основе были рассчитаны изменения во времени индексов стационарности по математическому ожиданию ( $I_{SM}$ ), пересчитанные в выборочные значения гауссовских случайных величин.

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

где  $M_{\text{ВЫБ}}^2 - M_{\text{ВЫБ}}^1$  – разность между выборочными средними значениями второй и первой половин ряда исследуемой величины или его сегмента (длиной не менее 40 лет), вычисляемыми по обычным формулам;  $\sigma(M_{\text{ВЫБ}}^{2,\text{МК}} - M_{\text{ВЫБ}}^{1,\text{МК}})$  – стандарт аналогичной разности, оцененный методом Монте-Карло для стационарной последовательности соответствующей длины и временной коррелированности, аппроксимированный специально подобранным аналитическим выражением.

В качестве показателя общей нестационарности рядов принята величина превышения 5%-го уровня вероятности того, что модуль  $I_{SM}$  выходит за «двойную сигму» (точнее, величину 1.96). Если в ряду есть хотя бы два частично перекрывающихся сегмента со статистически значимым уровнем нестационарности, весь ряд будет считаться содержащим нестационарность.

*Результаты.* При рассмотрении индивидуальных модельных реализаций, сгенерированные изменения испарения с поверхности океана в большинстве случаев показывают наличие монотонных трендов. Априорная вероятность повышения испарения составляет  $\sim 2/3$ , вероятность уменьшения  $\sim 1/3$ . Среднее ансамблевое годовое значение тренда по моделям составило 0.00008878 мм/сут в год или 0.0147 мм/сут за 165 лет. Несмотря на кажущееся малое значение, рассматриваемый средний тренд статистически значим (2.5 % за весь период). Вероятность повышения испарения можно объяснить в равных пропорциях воздействием глобального потепления, с одной стороны, и «повышательным» воздействием внутренних климатических процессов винеровского типа — с другой. Тренды, которые имеют отрицательный знак, очевидно, связаны с естественными процессами: в большей степени, внутренними процессами в системе и меньшей с «взрывными» вулканическими извержениями. Таким образом, можно предположить, что вероятность осуществления положительного монотонного тренда антропогенного происхождения в реальной атмосфере, оценивается  $\sim 1/3$ .

Оценка «эффективного» или «видимого» испарения ( $E_E$ ) играет важную роль при изучении водного баланса суши, так как величина  $E_E$  — количество влаги, остающееся на суше, т. е. теоретически так называемый «климатический» сток, разность между осадками и испарением/эвапотранспирацией на суше. Для вычисления  $E_E$  в глобальном масштабе применялся «обратный аэрологический метод в гидрологии» — по балансу влаги на поверхности всего Мирового океана оценивался конечный влагоперенос через береговую линию на сушу.

Проведенный анализ не выявил наличие в эффективном испарении с океана стабильного монотонного тренда, который мог бы быть вызван, предположительно, парниковым эффектом. Среднее значение индекса  $I_{SM}$

по всем моделям составило всего 0,3. Среднее ансамблевое значение  $E_E$  по всем моделям составляет 0,307 мм/сут, что близко к медианному значению (0,306) и к моде (0,304). Присутствующие в рядах разнонаправленные и равновероятные монотонные тренды, скорее всего, связаны с естественной изменчивостью внутри климатической системы или с меняющейся по времени комбинацией взрывных вулканических извержений. Представляется, что указанный эффект и является одной из основных причин парадокса — незначительности наблюдаемых изменений годового стока в конкретных створах большинства рек мира и глобально суммированного речного стока [1] при явной интенсификации испарения с океана.

Испарение с поверхности океана представляет собой исходный процесс формирования глобального водообмена, факторы которого сосредоточены исключительно в пределах океана. В то же время «эффективное испарение» более сложный процесс, включающий в себя многочисленные составляющие [7], не ограниченные акваторией океана (например, осадки). Каждая составляющая содержит в себе «климатический шум», сравнительно высокочастотные случайные колебания, обусловленные как «погодным возбуждением» атмосферы, так и специфическими, в том числе региональными и локальными, процессами на суше. В итоге суммарные шумы, воздействующие на эффективное испарение с океана посредством осадков над океаном, в относительном выражении превышают уровень шумов, содержащихся в исходном процессе испарения с океана, и могут эффективно маскировать содержащийся в нем тренд.

Таким образом, осадки над океаном в процессе преобразования испарения с поверхности океана в «видимое» или «эффективное» могут быть стационаризирующими или могут формировать процессы с близкой к белому шуму (неизменной по частотам) спектральной плотностью.

Средние изменения за 165-летний период не обнаруживают общего повышения стока. Ежегодная скорость изменений составляет незначительную отрицательную величину — 0,0000047 мм/сут — заведомо меньшую, чем ошибка в оценке этой величины.

Сравнение модельных рядов  $E_E$  и рядов модельного актуального суммарного стока ( $R$ ) с суши показывает, что коэффициенты парной корреляции чрезвычайно велики — в среднем 0,85. Таким образом, величины  $E_E$ , фактически являющиеся в глобальном масштабе величинами климатического стока, действительно тесно связаны с величинами актуального стока в конкретные годы, полученными на тех же моделях. Парные корреляции между годовыми величинами  $E_E$  и годовыми величинами  $R$  со сдвигом плюс один год оказались существенно меньше — в среднем по всем моделям составили всего 0,30. Для сдвигов  $>1$  года соответствующие парные

корреляции были статистически незначимы. Такая сильная коррелированность между рядами позволяет применить сделанный выше вывод об эволюции эффективного испарения с океана и к суммарному стоку с суши — осадки над океаном в очень значительной степени отфильтровывают монотонный тренд вследствие глобального потепления. Они также могут играть существенную роль в белошумном характере спектральной плотности изменений годовых величин глобально суммированного стока [1].

*Выводы.* Привлеченные к анализу результаты исторических экспериментов позволили авторам ответить на важный вопрос: почему вопреки современному росту испарения с поверхности океана не наблюдается значительного увеличения стока большинства рек мира? Причиной, по-видимому, является механизм преобразования испарения в «эффективное испарение» — разность между испарением с океана и осадками над океаном. Разность «осадки минус испарение» над океаном неизбежно попадает на сушу. И именно осадки над океаном оказывают стационаризирующую роль в отношении испарения с океана и в очень значительной степени отфильтровывают монотонный тренд вследствие глобального потепления в том, что касается глобальных изменений речного стока.

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

### Библиографические ссылки

1. Добровольский С. Г. Глобальная гидрология. Процессы и прогнозы. М.: Геос, 2017. 526 с.
2. Добровольский С. Г. Глобальные изменения речного стока. М.: Геос, 2011. 660 с.
3. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И. А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
4. World Climate Research Programme (WCRP). [Electronic resource]. URL: <https://www.wcrp-climate.org/wgcmcmip/wgcm-cmip6> (date of access: 03.02.2021)
5. Max Planck Institute fur Meteorology (MPI-M). Climate Data Operators [Electronic resource]. URL: <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo> (date of access: 03.02.2021)
6. PCMDI: Program for Climate Model. Diagnosis and Interpretation. [Electronic resource]. URL: <http://pcmdi9.llnl.gov> (date of access: 03.02.2021)
7. Добровольский С. Г., Юшков В. П., Соломонова И. В. Изменения глобального водообмена по результатам исторических экспериментов на климатических моделях проекта CMIP-6 // Водные ресурсы. 2023. Т 50, № 6. С. 751–766.
8. Добровольский С. Г., Юшков В. П., Соломонова И. В. Модели общей циркуляции атмосферы проекта CMIP-6 для диагноза изменения климатических параметров глобального водообмена // Системы контроля окружающей среды. 2023. № 3 (53). С. 16-26.