

## Совместная оценка вероятностных характеристик многолетнего речного стока и испарения в условиях современного климата и ожидаемых его изменений

Гайдукова Екатерина Владимировна, кандидат технических наук, доцент  
Бонгу Сотима Эрнесто, аспирант  
Джалалванд Али, аспирант  
Российский государственный гидрометеорологический университет  
Диавара Хамиду, доктор философии  
Университет Бамако, Мали

В статье [1] на примере Африканского континента представлена методология оценки долгосрочных изменений вероятностных характеристик многолетнего речного стока при изменении климата. Она базируется на стационарном варианте уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова. Последнее аппроксимируется системой алгебраических уравнений для начальных статистических моментов, с помощью которых вычисляются расчетные гидрологические характеристики (норма  $\bar{Q}$ , коэффициенты вариации  $Cv$  и асимметрии  $Cs$ ). С их помощью, по известным в статистике таблицам, находятся ординаты кривых обеспеченности, которые используются для проектируемых и эксплуатируемых гидротехнических сооружений.

В настоящее время кривые обеспеченности строят по фактическим рядам наблюдений. Использование рассматриваемой модели позволяет построить эти кривые с учетом климатических сценариев, предлагаемых Межправительственной комиссией экспертов по изменению климата [2]. Стационарность модели обуславливается характером климатических сценариев, которые рекомендуется использовать как 20–30-летние статистически равновесные периоды с неизменными нормами метеорологических характеристик (осадков и приземной температуры воздуха).

Выяснилось [3], что вероятностные распределения рядов многолетнего испарения также принадлежит классу распределений Пирсона. Это делает правомерным применение к испарению модели, аналогичной таковой для речного стока с несколько видоизмененной интерпретацией входящих в нее параметров. В ее основе лежит линейный формирующий фильтр

$$dQ = [-(\bar{c} + \tilde{c})E + \bar{N} + \tilde{N}]dt, (1)$$

где  $E$  – испарение с поверхности речного бассейна;  $c = \bar{c} + \tilde{c}$  и  $N = \bar{N} + \tilde{N}$  (здесь  $c = 1/k\tau$ ;  $N = \dot{X}/\tau$ ;  $k$  – коэффициент испарения;  $\tau$  – время релаксации речного бассейна;  $\dot{X}$  – интенсивность осадков;  $\bar{c}$ ,  $\bar{N}$  – математические ожидания;  $\tilde{c}$ ,  $\tilde{N}$  – белые гауссовские шумы с интенсивностями  $G_{\tilde{c}}$  и  $G_{\tilde{N}}$ , коррелирующиеся между собой с взаимной интенсивностью  $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$ ).

Уравнение (1) статистически эквивалентно модели Фоккера–Планка–Колмогорова, которая описывает марковскую эволюцию процесса формирования плотности вероятности многолетнего испарения. Эта модель аппроксимируется системой из четырех дифференциальных уравнений для начальных моментов  $m_i$ :

$$\begin{aligned} dm_1/dt &= -(\bar{c} - 0,5 G_{\tilde{c}})m_1 + \bar{N} - 0,5 G_{\tilde{c}\tilde{N}}; \\ dm_2/dt &= -2(\bar{c} - G_{\tilde{c}})m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3 G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_1 + G_{\tilde{N}}; \\ dm_3/dt &= -3(\bar{c} - 1,5 G_{\tilde{c}})m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7,5 G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_2 + 3G_{\tilde{N}}m_1; \\ dm_4/dt &= -4(\bar{c} - 2 G_{\tilde{c}})m_4 + 4\bar{N}m_3 - 4 \cdot 3,5 G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_3 + 6G_{\tilde{N}}m_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Алгоритм применения системы (2) сводится к двум этапам: 1) параметризация (нахождение  $\bar{c}$ ,  $G_{\tilde{c}}$ ,  $G_{\tilde{N}}$ ,  $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$ ) на основе известных моментов  $m_i$ , вычисленных по известным рядам испарения найденного по эмпирическим формулам для годового испарения, рекомендуемым Всемирной Метеорологической Организацией [4] – обратная задача; 2) введение в параметризованную модель сценарных характеристик климата и оценка численных значений ожидаемых моментов вероятностных распределений испарения, необходимых для построения прогнозных (сценарных) карт распределения его нормы  $\bar{E}$ , коэффициентов вариации  $Cv$  и асимметрии  $Cs$  по территории – прямая задача. Особенностью системы (2) является то, что младшие моменты не зависят от старших, а значит «отбрасывание» последних оставляет систему уравнений замкнутой. Это открывает возможность существенного упрощения рассматриваемой модели для испарения (как и в случае речного стока [3]).

На рис. 1 в качестве примера представлены карты пространственного распределения по территории Африки нормы (а) и коэффициента вариации (б) суммарного годового испарения, а также отклонений прогнозных норм от фактических (в) для сценария *Commit*(2040–2069).

В строительном проектировании используются кривые обеспеченности расхода и испарения, которые в рамках семейства распределений Пирсона строятся по первым трем моментам, а точнее расчетным характеристикам: норме, коэффициентам вариации и асимметрии. Совместное визуальное представление этих кривых обеспеченности можно осуществить, используя одномерные многообразия в трехмерном пространстве (обеспеченность  $P$ , испарение  $E$ , сток  $Q$ ). На рис. 2 представлены примеры подобных многообразий для речных бассейнов Африки, Ирана и России.

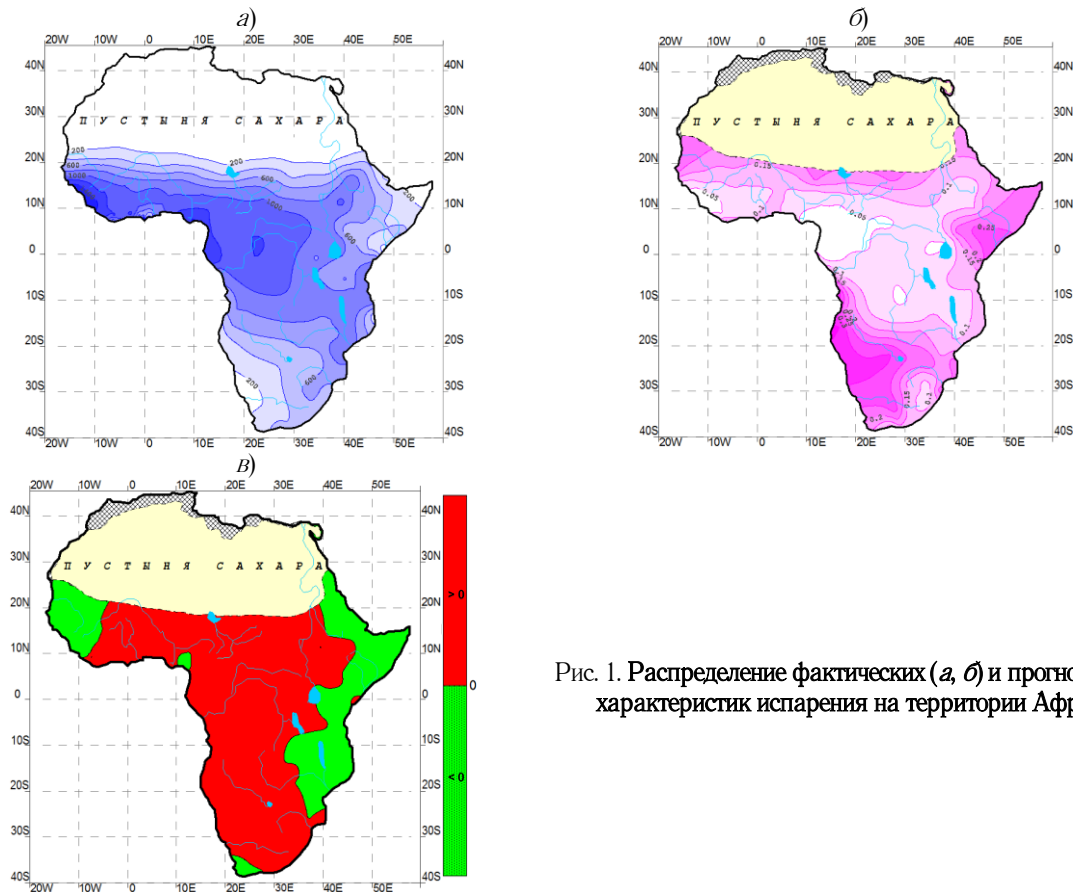


Рис. 1. Распределение фактических (а, б) и прогнозных (в) характеристик испарения на территории Африки

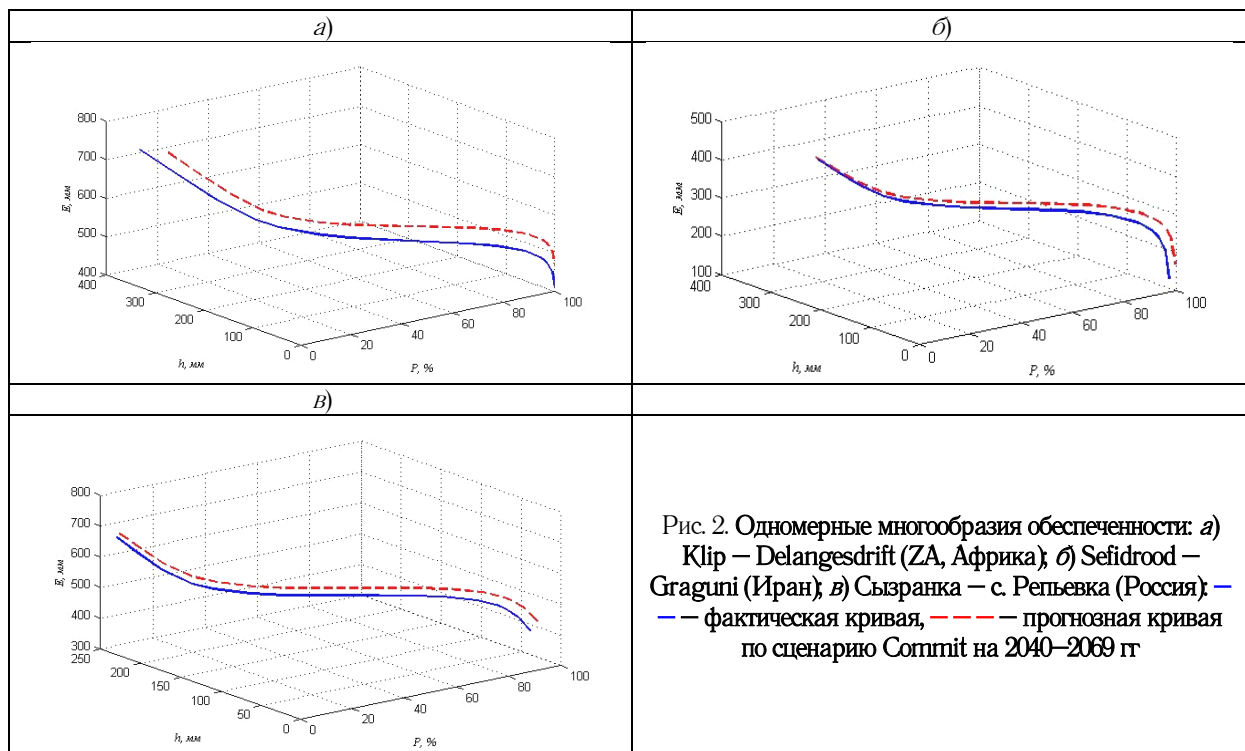


Рис. 2. Одномерные многообразия обеспеченности: а) Кліп – Delangesdrift (ЗА, Африка), б) Sefidrood – Graguni (Иран), в) Сызранка – с. Репьевка (Россия); — фактическая кривая, - - - прогнозная кривая по сценарию Commit на 2040–2069 гг

Подобные многообразия обеспеченности были построены для практически всех климатических зон Земного шара. Было обнаружено, что в большинстве случаев имеет место уменьшение коэффициента  $\gamma_{\dot{X}_{P\%}} = Q_{P\%} / E_{P\%}$ , по мере роста обеспеченности, т. е. по мере уменьшения осадков селективная ценность испарения увеличивается. Следовательно, в маловодные годы доля испарения в годовом балансе увеличивается по сравнению со стоком. В табл. 1 приведены выборочные данные, подтверждающие этот вывод.

Таблица 1. Изменчивость коэффициента  $\gamma \dot{X}_{P\%}$  в зависимости от обеспеченности речного бассейна ресурсами  $\dot{X}_{P\%}$

№ п/п	Река – пункт – страна – климатическая зона	Число лет наблюдений	Площадь бассейна, км <sup>2</sup>	$\gamma \dot{X}_{20\%}$	$\gamma \dot{X}_{50\%}$	$\gamma \dot{X}_{80\%}$
1	Сок – ст. Сургут – РФ – широколиственные степи и луговые степи умеренно континентального климата	49	4730	0,31	0,26	0,22
2	Самара – с. Елшанка – РФ – степи умеренно континентального климата	49	22800	0,15	0,12	0,09
3	Уфа – г. Красноуфимск – РФ – смешанные (хвойно-широколиственные) леса умеренно континентального климата	49	14200	0,66	0,56	0,50
4	Чепца – с. Полом – РФ – темнохвойная тайга умеренно континентального климата	49	5930	0,55	0,49	0,41
5	Sefidrood – Graguni – Iran – полупустыни и пустыни резко континентального климата	34	19600	0,17	0,13	0,10
6	Karun – Durod – Iran – сухие степи, редколесья и кустарники континентального климата	25	3400	0,66	0,64	0,63
7	Klip – Delangesdrift – South Africa – сезонно влажные смешанные (листопадные вечнозеленые) леса тропического пояса	40	4150	0,12	0,06	0,03
8	Doring – Elands Drift-Aspoort – South Africa – редколесья, саванны и кустарники восточных частей материков субтропического пояса	40	6890	0,16	0,11	0,06
9	Incomati – Hooggenoeg – South Africa – сезонно влажные смешанные (листопадные вечнозеленые) леса тропического пояса	40	5540	0,13	0,10	0,08

Таким образом, в данной статье получены следующие результаты.

1. Показано, что методика долгосрочных оценок вероятностных характеристик стока при изменении климата может быть использована и для аналогичных оценок многолетнего испарения. Это связано с тем, что вероятностные распределения испарения, также как и стока, принадлежат семейству распределений К. Пирсона, а значит, для описания их эволюции применима модель линейного формирующего фильтра.

2. Выявлена возможность эффективной совместной визуализации фактических и прогнозных кривых обеспеченности стока и испарения с помощью одномерного многообразия в пространстве обеспеченность – сток – испарение.

3. Обнаружено явление увеличения селективной ценности испарения по мере уменьшения осадков, которое имеет место практически во всех климатических поясах Земного шара.

Исследования частично финансировались грантом Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного контракта: «Чувствительность многолетнего речного стока и основных водозависимых отраслей экономики к изменениям климата» № 5.6293.2017/8.9.

#### Литература:

1. Kovalenko V. V., Gaidukova E. V., Diawara H., Bongu E. Long-term river runoff in South West Africa: scenario-based assessment of persistent changes // *Discovery Nature*, 2015, 9(22), pp. 42–47.
2. The IPCC Assessment reports [Электронный ресурс] // IPCC, 2009.– Режим доступа: <http://www.ipcc.ch> (дата обращения 09.02.2015).
3. Гайдукова Е. В., Диавара Х. Долгосрочная оценка вероятностных распределений многолетнего годового испарения при изменении климата на примере Африканского континента. Учебное пособие. – СПб.: изд. РГГМУ, 2016. – 111 с.
4. Руководство по климатологической практике // Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО), 2014.–147 с. Руководство по гидрологической практике // Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО), 1994.– 808 с.