

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»  
(РГГМУ)

На правах рукописи  
УДК [556.162+556.131](66)

Бонгу Сотима Эрнесто

**ВЕРОЯТНОСТНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕГО СТОКА  
И ИСПАРЕНИЯ С ТЕРРИТОРИИ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ  
ЗАПАДНОЙ АФРИКИ**

Специальность 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук



Санкт-Петербург  
2019

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете

**Научный руководитель:** Коваленко Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор

**Научный консультант:** Гайдукова Екатерина Владимировна, кандидат технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** Болгов Михаил Васильевич, доктор технических наук, Институт водных проблем РАН, зав. лабораторией моделирования поверхностных вод (г. Москва)

Харламова Наталья Фёдоровна, кандидат географических наук, доцент, Алтайский государственный университет, доцент кафедры физической географии и ГИС

**Ведущая организация:** Национальный исследовательский Томский государственный университет

Защита диссертации состоится «23» января 2020 г. в 13-30 часов на заседании диссертационного совета Д 003.008.01 Института водных и экологических проблем СО РАН по адресу: 656038, г. Барнаул, Молодежная ул., д. 1.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах просим направлять по адресу: 656038, г. Барнаул, Молодежная улица, д. 1, диссертационный совет.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института водных и экологических проблем СО РАН или на сайте [www.iwep.ru](http://www.iwep.ru)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат географических наук, доцент



И.Д. Рыбкина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На протяжении многих десятилетий при оценке формирования режима многолетнего речного стока служат его вероятностные распределения, получаемые по фактическим рядам инструментальных наблюдений. На их основе находятся расчетные гидрологические характеристики, с помощью которых строятся кривые обеспеченности и определяются значения проектных расходов, используемых при проектировании гидротехнических сооружений.

Однако в последнее время в связи с усложнением задач, решаемых инженерной гидрологией, возникает необходимость привлекать и другие составляющие уравнения водного баланса речных водосборов наряду со стоком, в частности испарение и изменение суммарных влагозапасов речных бассейнов. Например, Л.Г. Бавиной (ГГИ) была разработана расчетная схема получения обеспеченного водного баланса неосушенных болот в 1979 г. В ней обеспеченное значение стока ( $Q_{P\%}$ ) определяется разностью осадков той же обеспеченности ( $X_{P\%}$ ) и испарения ( $E_{P\%}$ ), обеспеченностью  $(100 - P)\%$ . По рекомендациям С. В. Сольского (ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева) обеспеченные значения суммарного испарения с суши необходимо учитывать при расчете стока техногенно-нагруженных территорий. Также они находят применение при выборе пункта и площадки для строительства атомных электростанций.

Сотрудники и аспиранты кафедры гидрофизики и гидропрогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) привлекают обеспеченные значения испарения и изменения суммарных влагозапасов ( $\Delta U$ ) для сценарных оценок гидрологических последствий изменения климата. Ими разработаны модели, описывающие эволюцию многомерных распределений плотности вероятности  $p(Q, E, \Delta U; t)$ , где  $t$  – время.

Таким образом, была актуализирована возможность использования совместных распределений стока и испарения не только практической потребностью, связанной с техногенным освоением территории Западной Африки, но и путем формирования необходимой базы гидрометеорологических информации, охватывающей как сток, так и испарение.

Цели и задачи исследования. Целью настоящего исследования является разработка и адаптация к условиям Западной Африки мето-

дики совместного учета вероятностных распределений стока и испарения с возможностью наглядного визуального представления их обеспеченных значений одномерным многообразием в многомерном пространстве.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- создание синхронизированной базы данных по многолетним стоку, осадкам и температуре воздуха с целью генерации рядов годового испарения по методу Тюрка;

- выполнение совместной статистической обработки рядов стока и испарения (вычисление нормы, коэффициентов вариации, асимметрии и автокорреляции) с предварительным анализом ее возможности (построение разностно-интегральных кривых для определения наличия многоводных и маловодных периодов, исследование рядов на однородность по математическому ожиданию и дисперсии на различных уровнях статистической значимости);

- теоретическое обоснование и практическое построение двумерных поверхностей плотностей вероятности  $p(Q, E)$  для речных бассейнов Западной Африки;

- построение и анализ безусловных и условных распределений стока с использованием двумерных распределений  $p(Q, E)$  для выявления степени повышения устойчивости условных распределений по сравнению с безусловными при уменьшении обеспеченности расходов воды;

- построение совместных одномерных многообразий обеспеченности стока и испарения для современного климата и для наиболее вероятностных климатических сценариев на XXI в.

Методика исследования и исходный материал. Решение поставленных задач основывалось как на использовании классических методов инженерной гидрологии (статистическая обработка сформированных совместных рядов стока и испарения), так и на методологии частично инфинитного моделирования, разработанной в РГГМУ (фрактальная диагностика рядов стока и испарения с целью определения размерности пространства вложения, исследование моделей формирования стока и испарения на устойчивость их решений – статистических моментов вероятностных распределений, модернизация моделей с целью обеспечения устойчивости и т. п.). В основе примененных методов прогнозирования лежали варианты модели линейного формирующего фильтра, обеспечивающие устойчивость решений за счет полной или частичной разгрузки от мультипликативного шу-

ма. Модель в различных вариантах прошла многочисленную апробацию на речных бассейнах Южной и Северной Америки, Африки и Евразии.

Вычисления осуществлялись на базе программной среды разработки *Visual Basic* и приложения *MatLab*.

Исходным материалом для проведения расчетов служили ряды гидрометеорологических элементов, опубликованные в изданиях Всемирной метеорологической организации, а также карты Мирового водного баланса. Частично использованы материалы, полученные бывшим аспирантом РГГМУ, кандидатом технических наук Диавара Хамиду (республика Мали). Сценарные оценки выполнялись с использованием пятого доклада (СМIP5) Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC).

Научная обоснованность и достоверность результатов работы основывается на том обстоятельстве, что фрактальная диагностика, проведенная в предыдущих независимых исследованиях рядов стока и испарения Западной Африки Куасси Би Гессан Арманом и Диавара Хамиду, показала, что подавляющее число рядов имеет размерность пространства вложения равную двум. Это объясняется тем, что из-за глубокого залегания грунтовых вод зона неполного насыщения принимает незначительное участие в процессах водообмена (поступающая в нее вода может рассматриваться как безвозвратные потери наряду с испарением, что и отражает формула Тюрка, в которой испарение часто называют обобщенно дефицитом влаги).

Что касается результатов статистических оценок, то выводы, сделанные на их основе в ходе исследования, получены либо в рамках, существующих в настоящее время, гидрологических нормативов, либо базируются на моделях Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК) и Пирсона прошедших апробацию почти на всех континентах.

Научная новизна и практическая значимость. В результате решения сформулированных задач были получены следующие основные результаты:

1. Создана совместная синхронизированная (впервые) база данных по речному стоку и испарению с поверхности суши Западной Африки, в которую вошло 46 рядов, применимых для дальнейшего использования при 5 %-ом уровне статистической значимости.

2. Впервые для Западной Африки получены двумерные эмпирические распределения  $p(Q, E)$  по 46 водосборам, на основе которых сформированы безусловные и условные распределения обеспеченности речного стока, по которым проведена оценка степени чувстви-

тельности расходов различных обеспеченностей к замене безусловных распределений условными.

3. Впервые построены совместные одномерные многообразия обеспеченности стока и испарения (для условных и безусловных распределений) для условий современного климата и для наиболее вероятного (*RCP4.5*, модели *ensemble*, *HadGEM2-ES*, *MPI-ESM-LR*) климатического сценария.

4. Впервые на основе совместных одномерных многообразий обеспеченности стока и испарения построены карты 0,1 %, 1 %, 10 %-ой обеспеченности стока и испарения для современного и прогнозируемого климата и выявлены регионы ожидаемых статистически значимых отклонений (аномалий), в которых возможны негативные последствия для отраслей экономики, производственные функции которых включают речной сток или испарение (либо и то и другое).

Диссертационное исследование выполнялось в рамках Научно-исследовательской работы (НИР) «Адаптация математических моделей формирования вероятностных характеристик многолетних видов речного стока к физико-географическим условиям России для целей обеспечения устойчивости их решений при моделировании и прогнозировании» (№ госрегистрации 01 2014 58678). Результаты исследования внедрены в учебный процесс РГГМУ по специальности 05.04.05 – Прикладная гидрометеорология (направленность (профиль) – Прикладная гидрология) и переданы в Главное управление воды и Гидрометеорологическую службу Республики Бенин.

#### Положения, выносимые на защиту:

1. Методика получения двумерных распределений плотности вероятности стока и испарения, адаптированная к условиям Западной Африки путем выявления статистически приемлемых (уровень значимости 5 %) рядов для целей получения условных распределений речного стока, обладающих устойчивыми расчетными характеристиками (нормой и коэффициентом вариации).

2. Совместные одномерные многообразия обеспеченности стока и испарения для условий современного климата и для наиболее вероятного (*RCP4.5*, модели *ensemble*, *HadGEM2-ES*, *MPI-ESM-LR*) климатического сценария.

3. Географические карты Западной Африки для стока и испарения 0,1 %, 1 % и 10 %-ой обеспеченности для фактических и сценарных климатических условий, полученные как следствие совместных одномерных многообразий обеспеченности.

4. Оценки чувствительности одномерных многообразий обеспеченности к уменьшению значений обеспеченности расходов воды, показывающие ее увеличение.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на заседаниях Итоговой секции Ученого Совета РГГМУ в 2015 и 2016 гг., и семинарах кафедры гидрофизики и гидропрогнозов гидрологического факультета РГГМУ. Также промежуточные результаты работы были представлены на конференциях: *XLI* Международная заочная научно-практическая конференция «Технические науки – от теории к практике» (Новосибирск, 2014), *XVI* Международная научно-практическая конференция (Москва, 2014), *VIII* и *IX* Всероссийская научная экологическая конференция «Вода – источник жизни на Земле» (Санкт-Петербург, 2015, 2016), *XI* Международный Большой географический фестиваль «Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета» (Санкт-Петербург, 2015), *III* Международная научно-практическая конференция «Технические науки в мире: от теории к практике» (Ростов-на-Дону, 2016) и *International Conference on Engineering Technology, Engineering Education and Engineering Management* (Китай, 2014).

По теме диссертации опубликовано 15 статей, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, 3 в зарубежных изданиях (2 – в высокорейтинговых журналах).

Личный вклад автора. Научные положения, выносимые на защиту, получены лично автором. В публикациях, подготовленных в соавторстве, автору принадлежат формулировка задач, сбор и обработка исходных данных по речным бассейнам Западной Африки.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и 9 приложений. Работа изложена на 351 страницах и включает 39 рисунков и 8 таблиц. Список использованных источников состоит из 56 источников российских и зарубежных авторов.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы, рассматриваются научная новизна и практическая значимость исследования, перечисляются положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена формированию совместной базы данных по стоку и испарению.

Выбирались речные бассейны, площади которых находятся в пределах от 1000 км<sup>2</sup> до 50000 км<sup>2</sup>. Речной сток на них формируется под воздействием зональных факторов, исключается влияние аazonальных и полизональных особенностей, которые характерны для площадей до 1000 км<sup>2</sup> и больше 50000 км<sup>2</sup> соответственно. Еще одним критерием отбора водосборов было наличие продолжительного (не менее 40 лет) периода наблюдения за стоком. Таким образом, было отобрано 46 водосборов, расположенных на территории Западной Африки. Так как гидрологические расчеты, построение карт статистических характеристик речного стока производится относительно центра водосбора, то последние были определены методом средневзвешенных площадей (рис. 1).

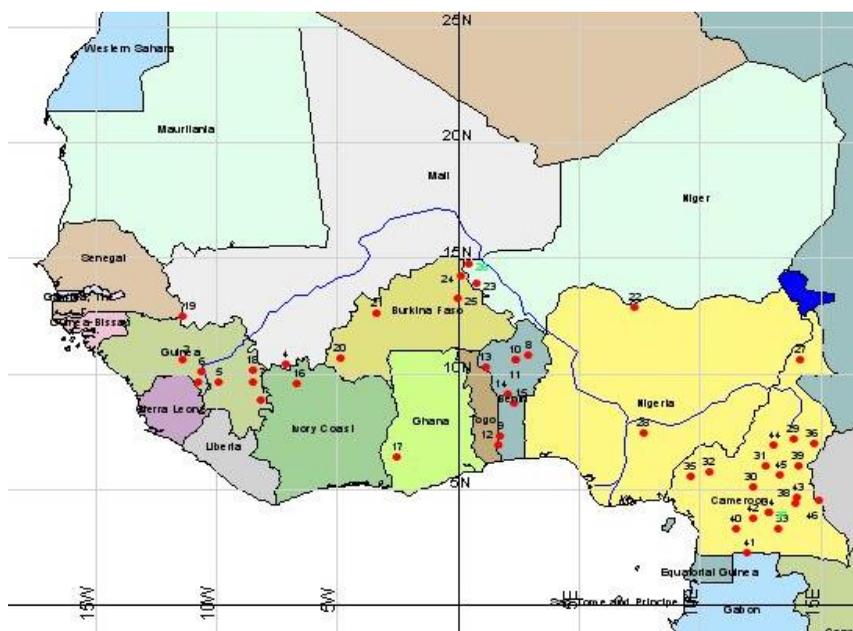


Рис. 1. Местоположение центров выбранных для исследования водосборов.

Ряды испарения генерировались по формуле Тюрка, включающей сумму годовых осадков и среднегодовую температуру воздуха, информация по которым была взята из данных Всемирной метеорологической организации:

$$E = P / \sqrt{0,9 + \frac{P^2}{(300 + 25T + 0,05T^3)^2}}, \quad (1)$$

где  $E$  – суммарное годовое испарение, мм/год;  $P$  – годовое количество осадков, мм/год;  $T$  – среднегодовая температура воздуха, °С.

Выбор формулы Тюрка обусловлен проведенным совместно с Диавара Хамиду критическим анализом методов расчета испарения для условий Африки (в списке публикаций № 5).

Ряды стока и испарения были проверены на однородность (все ряды однородны на 5 % уровне значимости). Построены разностно-интегральные кривые и рассчитаны статистические характеристики.

Распределения статистических характеристик стока и испарения по территории Западной Африки закартированы.

**Вторая глава** посвящена многомерным кривым плотности вероятности стока и испарения для существующего гидрометеорологического режима.

В последние десятилетия в РГГМУ получены результаты, указывающие на то, что статистические моменты вероятностных распределений многолетних рядов речного стока могут быть неустойчивыми. Имеется в виду неустойчивость решения модели формирования стока (и испарение) в виде системы уравнений для начальных моментов  $m_n$  ( $n = \overline{1,4}$ ):

$$\begin{aligned} dm_1/dt &= -(\bar{c} - 0,5G_{\tilde{c}})m_1 - 0,5G_{\tilde{c}\tilde{N}} + \bar{N}; \\ dm_2/dt &= -2(\bar{c} - G_{\tilde{c}})m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_1 + G_{\tilde{N}}; \\ dm_3/dt &= -3(\bar{c} - 1,5G_{\tilde{c}})m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7,5G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_2 + 3G_{\tilde{N}}m_1; \\ dm_4/dt &= -4(\bar{c} - 2G_{\tilde{c}})m_4 + 4\bar{N}m_3 - 14G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_3 + 6G_{\tilde{N}}m_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $c = 1/(k\tau) = \bar{c} + \tilde{c}$ ;  $\bar{N} = \dot{X}/\tau = \bar{N} + \tilde{N}$  ( $\bar{c}$  и  $\bar{N}$  – математические ожидания;  $\tilde{c}$  и  $\tilde{N}$  – белые шумы с интенсивностями  $G_{\tilde{c}}$ ,  $G_{\tilde{N}}$  и взаимной интенсивностью  $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$ );  $k$  – коэффициент стока;  $\tau$  – время релаксации бассейна.

Из системы (1) видно, что при  $\bar{c} < 0,5nG_{\bar{c}}$  производная  $dm_n/dt > 0$ , т. е.  $m_n \rightarrow \infty$ . Это стремление моментов к бесконечности – есть формальный признак неустойчивости. Неустойчивость для момента  $n$ -го порядка  $m_n$  возникает при  $\beta = G_{\bar{c}}/\bar{c} > 2/n$  ( $m_3: \beta > 2/3$ ,  $m_2: \beta > 1$ ,  $m_1: \beta \rightarrow 2$ ). При  $G_{\bar{c}} \approx \bar{c}$  мультипликативная составляющая в системе (1) стремится к нулю и при сценарных оценках прогнозных моментов с использованием различных вариантов модели (1) производится деление на нуль (или близкое к нему значение), что недопустимо (или нежелательно). Неустойчивость указывает на то, что сток (или испарение) формируется по более сложной схеме, чем это следует из уравнения Пирсона, например, имеет место их взаимодействие. Учет последнего фактора требует перехода к двумерным распределениям.

Для преодоления данной проблемы в РГГМУ была разработана методология частично инфинитного моделирования, которая включает в себя процедуру включения в модель формирования стока новых переменных (в нашем случае испарения), которые уменьшают (частично или полностью) мультипликативную составляющую шумов. Вместо одномерного уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК) применяется  $n$ -мерное

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\sum_{i=1}^n \frac{\partial(A_i p)}{\partial Y_i} + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial^2(B_{ij} p)}{\partial Y_i \partial Y_j}, \quad (3)$$

где  $p$  – плотность вероятности;  $\bar{Y} = (Q, E)$ ;  $A_i, B_{ij}$  – коэффициенты сноса и диффузии;  $n = 2$ .

В этом случае (как показано сотрудниками кафедры гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ) устойчивость моментов повышается:

$$\text{div} \bar{A} = \sum \partial A_i / \partial Q_i = -(\bar{c}_Q - 0,5G_{\bar{c}_Q}) - (\bar{c}_E - 0,5G_{\bar{c}_E}) < 0, \quad (4)$$

где  $\bar{c}_E$  и  $G_{\bar{c}_E}$  математическое ожидание и интенсивность шума мультипликативной составляющей модели испарения.

К настоящему времени неравенство (3) подтверждено на обширном и достаточно надежном материале по России. Для Европейской территории России (ЕТР) установлено, что критерий устойчивости

стока  $\beta_Q$  уменьшается с юга на север, а критерий устойчивости испарения  $\beta_E$  – с севера на юг. Происходит взаимная стабилизация стока и испарения, которая обеспечивает статистическую устойчивость их вероятностных распределений.

Для обоснованного усложнения моделей формирования многолетнего стока Западной Африки необходимо проверить как минимум два условия: 1) наличие речных бассейнов с фрактальной размерностью больше 1 (размерность пространства вложения 2); 2) наличие зон неустойчивости по статистическим моментам. Проверка первого условия проводилась методами фрактальной диагностики, а второго – с помощью полученной ранее в РГГМУ формуле

$$\beta = 2k \ln r + 2, \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент стока (испарения);  $r$  – коэффициент автокорреляции стока (испарения) при годовой сдвигке. Результаты проверки этих условий были получены Куасси Би Гессан Арманом (Кот-Д'Ивуар) в 2008 г. и представлены на рис. 2.

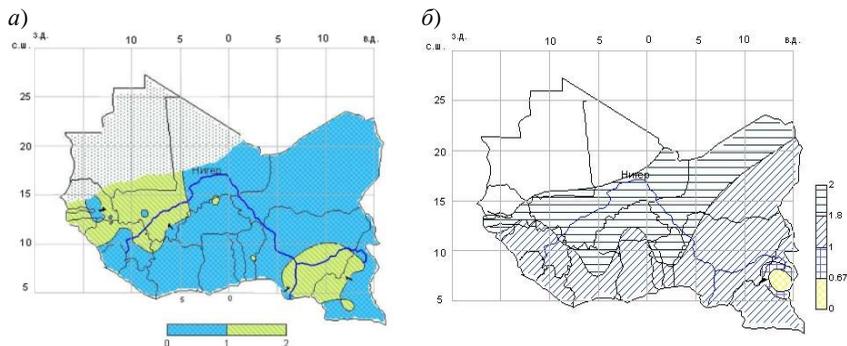


Рис. 2. Размерности пространства вложения рядов годового стока (а) и зоны неустойчивости статистических моментов (б).

Таким образом, имеются предпосылки для перехода к двумерному распределению плотности вероятности  $p(Q, E)$ .

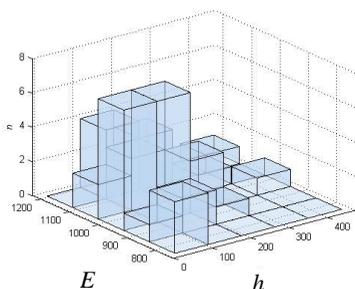
По имеющимся совместным рядам слоя стока и испарения строились эмпирические двумерные гистограммы (примеры см. рис. 3).

Наличие эмпирических двумерных гистограмм создает возможности для разработки различных двумерных вариантов уравнения (2) и способов их решения. В частности для случайных установившихся процессов предложен двумерный аналог уравнения Пирсона для  $p(Q, E)$ ,

$E$ ). Оно представляет собой уравнение в частных производных первого порядка, а его решением методом характеристик служит двумерная поверхность в трехмерном пространстве  $p(Q, E)$ .

В инженерной гидрологии широко применяется понятие кривой обеспеченности  $P(Q)$ . В одномерном случае распределение плотности вероятности  $p(Q)$  преобразуется в кривую  $P(Q)$ , понятие же «двумерная обеспеченность» не применяется. Поэтому, на первый взгляд, многомерные распределения имеют широкую область применения в теоретической гидрологии, но в проектной практике их использование для задания расходов требуемой обеспеченности затруднительно (по крайней мере, такого опыта у проектировщиков нет). Ниже описан возможный паллиатив по использованию распределений  $p(Q, E)$  для получения одномерных кривых обеспеченности с более устойчивыми статистическими моментами.

а)



б)

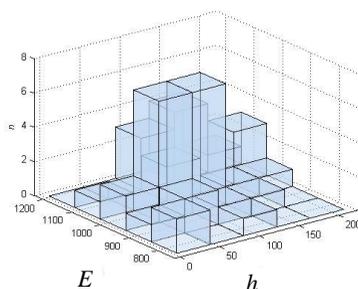


Рис. 3. Примеры двумерных гистограмм а – р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Amont; б – р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Aval.

Идея заключается в переходе от безусловных распределений  $p(Q)$  (или  $P(Q)$ ) к условным, в которых условием служит информация об испарении, получаемая из двумерных распределений  $p(Q, E)$ . На эллипсах рассеивания (рис. 4) выбирается диапазон  $\Delta E$ , включающий в себя значение нормы испарения  $\bar{E}$ , и отсекается от остального поля точек. По точкам, попавшим в диапазон  $\Delta E$ , строятся условные кривые обеспеченности ( $p(Q/\Delta E)$ ). В результате этой процедуры происходят как негативные, так и позитивные последствия.

1. Происходит усечение ряда расходов воды за счет маловероятных значений расхода и испарения. Погрешность определения нормы, коэффициентов вариации  $C_v$  и асимметрии  $C_s$  при этом, разумеется, увеличивается.

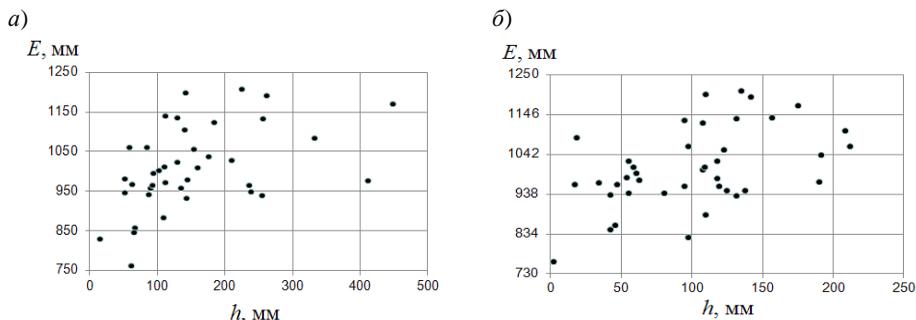


Рис. 4. Примеры эллипсов рассеивания: *а* – р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Amont; *б* – р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Aval.

2. Однако применение условных распределений открывает возможность корректного прогнозирования в зонах с неустойчивым формированием стока. Природа этой корректности связана с тем, что, применяя условные устойчивые распределения, мы уходим от необходимости деления на величину  $(\bar{c} - 0,5G_{\bar{c}})$ , что имеет место при  $\beta \rightarrow 2$ .

Таким образом, эффект от применения условных распределений (по сравнению с неустойчивыми безусловными) достигается за счет того, что мы, отбрасывая члены рядов с большими значениями испарения, уменьшаем интенсивность мультипликативного шума  $G_{\bar{c}}$ , оставляя неизменным параметр  $\bar{c}$ , т. е. увеличиваем разность  $(\bar{c} - 0,5G_{\bar{c}})$ . (По существу, таким же путем, правда неявно, идет и классическая гидрология, выбрасывая из рассмотрения четвертый момент  $m_4$ , связанный с эксцессом и интенсивностью  $G_{\bar{c}}$ , а значит и с «поднятием хвоста» распределения  $P(Q)$ .) Так как она не имеет дело с генетическими моделями (1), то проблемы неустойчивости, в рассматриваемом нами смысле, для нее вообще не существует.

На рис. 5 приведен пример, показывающий, что проэкстраполированный в зону малых обеспеченностей «хвост» условного распределения быстрее приближается к оси стока, чем безусловный. Объективную картину скорости этого приближения дает таблица результатов вычисления слоя стока 0,1; 1; 10 %-ной обеспеченности по безусловным и условным распределениям (в таблице: откл. = (безусл. – усл.)/усл.). Отклонения встречаются и минусовые, но в целом (среднем арифметическом) условные распределения имеют меньшие зна-

чения, причем тем меньше, чем меньше обеспеченность (по данным РГГМУ аналогичная картина наблюдается и на ЕТР).

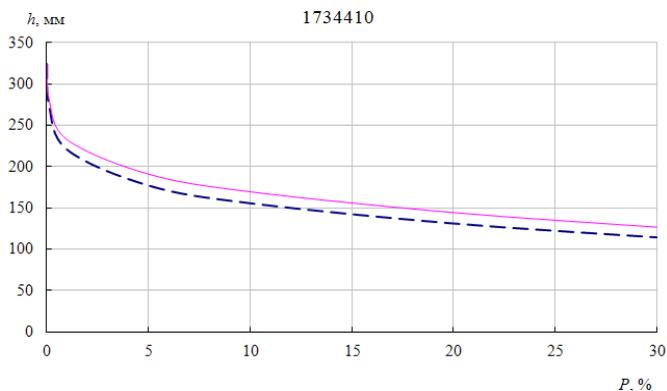


Рис. 5. Безусловные (—) и условные (---) кривые обеспеченностей (р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Aval).

Таблица

**Сопоставление безусловных и условных обеспеченных значений стока**

№ поста	Река	Станция	Обеспеченность, %								
			0,1			1			10		
			безусл.	усл.	откл., %	безусл.	усл.	откл., %	безусл.	усл.	откл., %
1	Tinkisso	Dabola	1401	1213	13	1052	940	11	668	627	6
3	Niger	Faranah	1735	1984	-14	1512	1660	-10	1225	1288	-5
4	Milo	Kankan	1090	923	15	978	848	13	821	738	10
5	Niandan	Baro	1164	1200	-3	1016	1052	-4	812	844	-4
6	Niger	Kouroussa	1340	1092	18	1040	895	14	707	657	7
7	Sankarani	Mandiana	1003	837	17	802	702	12	581	544	6
8	Irane	Koutakoukrou	543	732	-35	398	480	-21	238	230	3
9	Couffo	Lanhounta	680	374	45	444	274	38	210	164	22
10	Alibori	Route Kandi-Banikoara Amont	627	634	-1	461	449	3	282	260	8

№ поста	Река	Станция	Обеспеченность, %								
			0,1			1			10		
			безусл.	усл.	откл., %	безусл.	усл.	откл., %	безусл.	усл.	откл., %
11	Alibori	Route Kandi-Banikoara Aval	282	275	3	233	221	5	170	156	8
12	Mono	Athieme	764	462	40	601	383	36	395	283	28
14	Oueme	Pont De Save	548	297	46	423	253	40	277	195	30
15	Oueme	Bonou	666	128	81	462	128	72	253	128	49
16	Bagoé	Tombougou 1	1709	1069	37	1267	898	29	819	702	14
18	Sankarani	Gouala	1164	992	15	865	744	14	538	469	13
19	Faleme	Gourbassy	837	507	39	667	463	31	463	397	14
20	Comoe	Diarabakoko	446	429	4	352	328	7	241	214	11
21	Black Volta	Boromo	73	56	24	62	50	19	47	42	10
22	Maradi	Madarounfa	148	184	-24	110	131	-20	68	76	-12
23	Dargol	Kakassi	73	63	14	60	51	14	43	36	16
24	Garouol	Dolbel	148	165	-12	110	118	-8	69	70	-1
25	Sirba	Garbe-Kourou	57	43	24	48	34	29	36	24	34
26	Garouol	Alcongou	34	43	-27	23	29	-30	12	15	-34
27	Tsanaga	Bogo	1022	386	62	672	316	53	324	236	27
28	Bini	Berem	685	653	5	652	635	3	601	597	1
29	Vina	Lahore	897	859	4	878	852	3	825	817	1
30	Ndjeke	Ngongon	517	560	-8	497	513	-3	453	445	2
31	Mape	Magba	1057	1022	3	998	962	4	906	873	4
32	Noun	Bafoussam	941	847	10	901	835	7	827	794	4
33	Dja	Somalomo	709	597	16	616	529	14	502	445	11
34	Nyong	Ayos	460	484	-5	447	469	-5	413	430	-4
36	Mbere	Mbere	897	1058	-18	763	869	-14	607	659	-8

№ поста	Река	Станция	Обеспеченность, %								
			0,1			1			10		
			безусл.	усл.	откл., %	безусл.	усл.	откл., %	безусл.	усл.	откл., %
37	Nyong	Akonolinga	454	468	-3	443	456	-3	413	423	-2
38	Kadei	Batouri	605	564	7	552	514	7	487	456	6
39	Lom	Betare-Oya	783	881	-13	695	759	-9	595	624	-5
40	Nyong	Kaya	561	564	0	540	542	0	495	492	1
41	Ntem	Ngoazik	814	860	-6	722	769	-7	603	643	-7
42	Nyong	Olama	848	950	-12	750	775	-3	611	578	5
43	Kadei	Pana	549	549	0	496	489	1	430	418	3
44	Djerem	Mbakaou	961	1022	-6	878	933	-6	763	809	-6
45	Mbam	Goura	712	720	-1	692	694	0	644	636	1
46	Logone	Moundou	670	780	-16	632	690	-9	554	566	-2
среднее отл., %			17			14			10		

**В третьей главе** было проведено построение одномерных многообразий кривых обеспеченности для существующего режима климата.

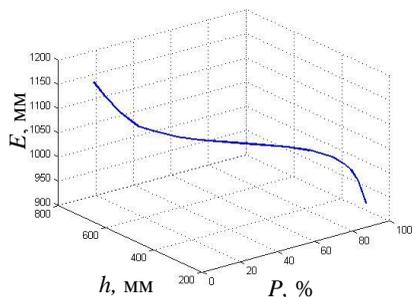
В настоящее время кривые обеспеченности строят по фактическим рядам наблюдений. Использование модели, основанной на уравнении ФПК, позволяет построить эти кривые с учетом климатических сценариев, предлагаемых Межправительственной комиссией экспертов по изменению климата. Стационарность модели обуславливается характером климатических сценариев, которые рекомендуется использовать как 20–30-летние статистически равновесные периоды с неизменными нормами метеорологических характеристик (осадков и приземной температуры воздуха). Выяснилось, что вероятностные распределения рядов многолетнего испарения также принадлежат классу распределений Пирсона. Это делает правомерным применение к испарению модели, аналогичной таковой для речного стока с несколько видоизмененной интерпретацией входящих в нее параметров.

В строительном проектировании используются кривые обеспеченности расхода, а с недавних пор 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, испарение, сток).

Технические возможности эффективной совместной визуализации кривых обеспеченности стока и испарения с помощью одномерного многообразия в пространстве обеспеченность – сток – испарение реализовывались в компьютерном приложении *MatLab*.

Одномерные многообразия были построены для всех рассматриваемых водосборов Западной Африки (рис. 6). На рис. 7 показаны значения стока и испарения 10 %-ой обеспеченности. Аналогичная визуализация выполнена для характеристик 0,1 % и 1 %-ной обеспеченности.

а)



б)

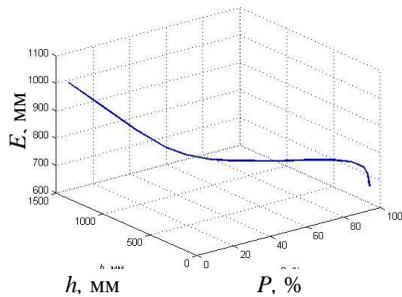


Рис. 6. Одномерные многообразия обеспеченности для рек Западной Африки: а – р. Lom – ст. Betare-Oya; б – р. Bini – ст. Verem.

На рис. 8 представлен пример карты распределения стока и испарения 0,1 %-ной обеспеченности (аналогичные карты получены и для других обеспеченностей).

В **четвертой главе** рассмотрены сценарные оценки одномерных многообразий кривых обеспеченности для наиболее вероятного климатического сценария.

Были выбраны наиболее подходящие модели, освещающие весь диапазон возможного повышения температуры приповерхностного воздуха ( $\Delta T$ ) при условиях сценария *RCP4.5*: ансамбль моделей 5-го

оценочного доклада *ensemble* ( $\Delta T = 3,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ), модель Центра климатических прогнозов и исследований Хэдли (Великобритания) *HadGEM2-ES* ( $\Delta T = 4,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и модель Института Макса Планка *MPI-ESM-LR* ( $\Delta T = 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

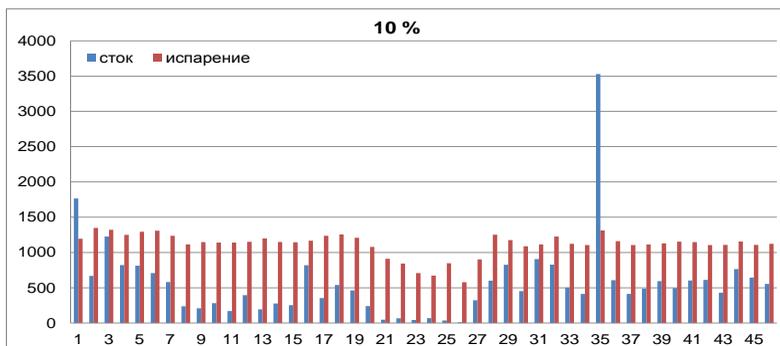


Рис. 7. Значения стока и испарения 10 %-ной обеспеченности (по горизонтальной оси отложены номера постов в соответствии с таблицей).

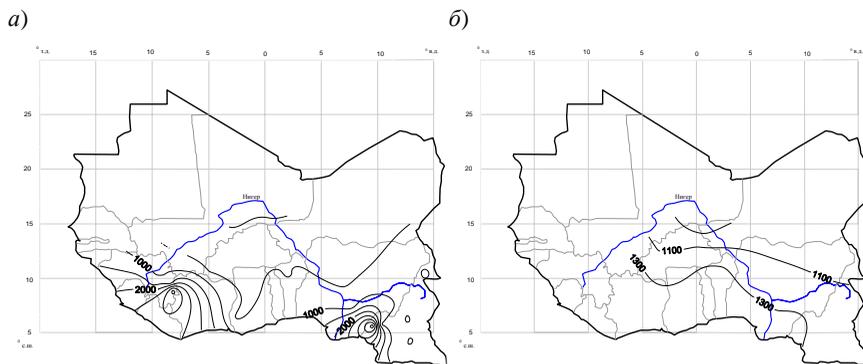


Рис. 8. Карты распределения стока (а) и испарения (б) 0,1 %-ной обеспеченности.

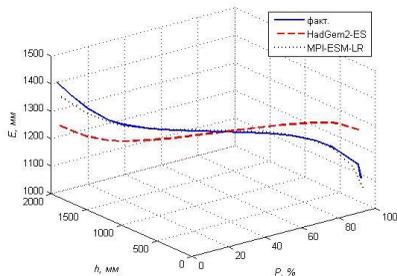
По методике, изложенной в главе 3, построены совместные, фактические и прогнозные, одномерные многообразия, пример которых показан на рис. 9. По этим многообразиям построены прогнозные карты и карты аномалий (пример см. на рис. 10).

**В заключении** сформулированы основные результаты исследований:

1. Обработкой фактических рядов наблюдений за речным стоком, осадками и приземной температурой воздуха удалось создать син-

хронные ряды этих гидрометеорологических характеристик и, используя метод Тюрка, сгенерировать ряды испарения для дальнейшего статистического анализа и обработки совместно с рядами многолетнего речного стока.

а)



б)

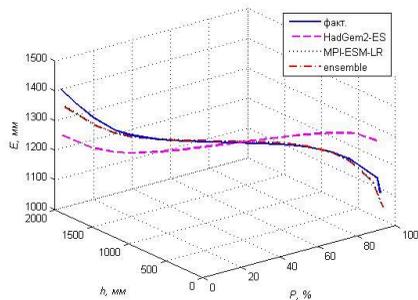
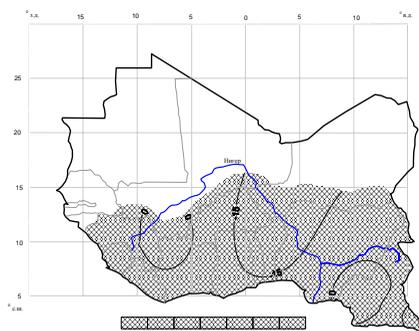


Рис. 9. Фактические и прогнозные одномерные многообразия для р. Niger – ст. Farama: а – период с 2016 по 2035 гг.; б – период с 2046 по 2065 гг.

а)



б)

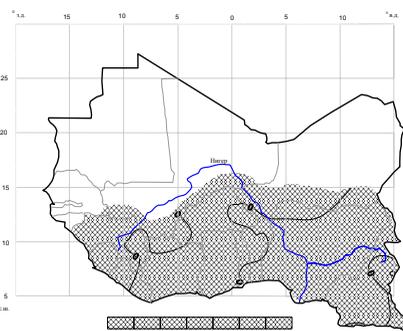


Рис. 10. Карты статистически значимых отклонений фактических и прогнозных значений стока (а) и испарения (б) 1 %-ной обеспеченности (модель *HadGEM2-ES*, 2016–2035 гг.).

2. Синхронные совместные ряды стока и испарения подверглись проверке на стационарность (однородность) по статистическим критериям Фишера и Стьюдента, а также – на наличие многоводных и маловодных периодов путем построения разностно-интегральных кривых. В результате удалось сформировать базу гидрометеорологических данных по территории Западной Африки, необходимых для

получения двумерных вероятностных распределений стока, в которую вошло 46 статистически приемлемых (уровень значимости 5 %) рядов для получения условных распределений речного стока с устойчивой нормой и коэффициентом вариации.

3. Построены двумерные распределения плотности вероятности  $p(Q, E)$ , с использованием которых получены безусловные и условные распределения  $p(Q)$  с повышенной устойчивостью статистических моментов за счет частичной разгрузки от мультипликативных шумов, порождаемых вариациями потерь стока на испарение.

4. Установлено, что с уменьшением обеспеченности расходов воды расхождение хвостов условных и безусловных кривых вероятностных распределений увеличиваются.

5. Найдена возможность визуализации совместных кривых обеспеченности речного стока и испарения путем построения совместных одномерных многообразий в трехмерном пространстве обеспеченность – сток – испарение, которая реализована на примере речных бассейнов Западной Африки для условий существующего и наиболее вероятного сценарного климата в XXI в.

6. Получены географические карты 0,1 %, 1 % и 10 %-ой обеспеченности стока и испарения для современного и прогнозируемого климата, с помощью которых выявлены регионы наиболее значимых аномалий, в которых возможны негативные последствия для водозависимых отраслей экономики Западной Африки.

### **Список публикаций по теме диссертации:**

#### **В журналах, входящих в список ВАК:**

1. Сценарная оценка испарения с водосборов Бенина // Естественные и технические науки. 2016. № 6. С. 74–77. (в соавторстве с Эспития Э., Гайдуковой Е.В., Викторовой Н.В.).

2. О возможности учета испарения при моделировании процесса формирования многолетнего речного стока (на примере Западной Африки) // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 44. С. 45–53 (в соавторстве с Коваленко В.В., Гайдуковой Е.В., Соловьевым Ф.Л., Джалалованд А.).

3. Сценарная оценка нормы изменений суммарных влагозапасов речных бассейнов // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 53. С. 113–122 (в соавторстве с Гайдуковой Е.В., Баймаганбетовым А., Синкпеун Л.).

В других журналах:

4. Апробация методики долгосрочной оценки многолетних характеристик испарения для речных бассейнов Африки // Технические науки – от теории к практике (XLI международная научно-практическая конференция), 2014. № 12 (37). С. 115–123. (в соавторстве с Коваленко В.В., Гайдуковой Е.В., Диавара Х.).

5. Критический анализ методов расчета суммарного испарения для речных бассейнов Африки // Теория и практика современной науки: XVI Международная научно-практическая конференция / Науч.-инф. издат. Центр «Институт стратегических исследований». Москва: Изд-во «Институт стратегических исследований», 2014. С. 531–537. (в соавторстве с Гайдуковой Е. В., Диавара Х.).

6. Моделирование процесса формирования многолетнего речного стока Африки // Вода – источник жизни на Земле: материалы VIII-й всероссийской научной экологической конференции школьников и студентов, посвященной Всемирным дням Воды и Земли. СПб: ООО «Р-КОПИ», 2015. С. 136 (в соавторстве с Судаковой Н.В., Диавара Х.).

7. Сценарная оценка климатических характеристик Африки // XI международный Большой географический фестиваль (БГФ-2015) студентов и молодых ученых, посвященный 70-летию победы в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг. и 170-летию Русского Географического Общества. СПб.: изд-во СПбГУ, 2015. С. 509–514 (в соавторстве с Диавара Х., Синкпеун Л.).

8. *Assessment of changes in characteristics of runoff of Africa for various climate scenarios // International Conference on Engineering Technology, Engineering Education and Engineering Management. – China, ETTEEM, 2014, pp. 581–583 (в соавторстве с V. V. Kovalenko, E. V. Gaidukova, M. Kuassi, H. Diawara).*

9. *Long-term river runoff in South West Africa: scenario-based assessment of persistent changes // Discovery Nature, 9(22), 2015, pp. 42–47 (в соавторстве с Kovalenko V. V., Gaidukova E. V., Diawara H.).*

10. *Joint assessment of the probability characteristics of long-term river run-off and evaporation in today's climate conditions and in the expected changes // International Journal of Engineering Research And Management (IJERM). 2016. P. 83–86 (в соавторстве с Kovalenko Viktor V., Gaidukova Ekaterina V., Diawara H., Dzhahalvand A.).*

11. Сценарная оценка гидрологического режима рек Бенина // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2016. Т. 2. № 1. – <http://vestnik-nauki.ru/>

12. Построение двумерных гистограмм для рек Западной Африки // Вода – источник жизни на Земле: материалы IX-й всероссийской научной экологической конференции школьников и студентов, посвященной Всемирным дням Воды и Земли. 2016. С. 86–87 (в соавторстве с Судаковой Н.В., Джалалванд А.).

13. Учет испарения при моделировании процесса формирования речного стока в Западной Африке // Материалы III Международной научно-практической конференции «Технические науки в мире: от теории к практике». Ростов-на-Дону, 2016. С. 86–95 (в соавторстве с Коваленко В.В., Гайдуковой Е.В., Джалалванд А.).

14. Сценарная оценка безопасности газопроводов при изменении климата // Технические науки – от теории к практике. 2015. №51. С. 136–143 (в соавторстве с Гайдуковой Е.В., Судаковой Н.В.).

15. Совместная оценка вероятностных характеристик многолетнего речного стока и испарения в условиях современного климата и ожидаемых его изменений // Евразийское Научное Объединение. 2018. Т. 2. № 7 (41). С. 139–142 (в соавторстве с Гайдуковой Е.В., Джалалванд А., Диавара Х.).

*Отпечатано с готового оригинал-макета*

Лицензия ЛР № 0203090 от 30.12.96

---

Подписано в печать с оригинал-макета  
Формат 60х90 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Уч.-изд. л. 1,5. Печ. л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ №

---

РГГМУ, 192007, СПб, Воронежская ул., 79