

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

На правах рукописи
УДК [556.13.06:551.583](6)"45"

Диавара Хамиду

ДОЛГОСРОЧНАЯ ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТНЫХ
РАСПРЕДЕЛЕНИЙ МНОГОЛЕТНЕГО ГОДОВОГО ИСПАРЕНИЯ
С ТЕРРИТОРИИ АФРИКИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

Специальность 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук



Санкт-Петербург
2015

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете

Научный руководитель: Коваленко Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Российский государственный гидрометеорологический университет

Научный консультант: Гайдукова Екатерина Владимировна, кандидат технических наук, доцент, Российский государственный гидрометеорологический университет

Официальные оппоненты: Мазуров Геннадий Иванович, доктор географических наук, профессор, г.н.с., Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова (ГГО).

Громова Марина Николаевна, кандидат технических наук,

Ведущая организация: Государственный гидрологический институт (ГГИ)

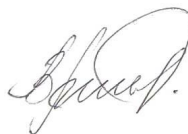
Защита диссертации состоится «29» октября 2015 г. в 15³⁰ часов на заседании специализированного совета Д212.197.02 Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98

Отзывы на автореферат в двух экземплярах просим направлять по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, диссертационный совет.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета

Автореферат разослан «29» сентября 2015 г.

Заслуженный работник высшей школы РФ,
Ученый секретарь специализированного совета,
профессор, кандидат географических наук



Воробьев В. Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Определение оценок суммарного испарения с речных бассейнов является одной из основных задач, решаемых в гидрометеорологии. Исследованием процесса суммарного испарения с поверхности суши занимались выдающиеся русские ученые климатологи и гидрологи, такие как А. Р. Константинов, М. И. Будыко, и др. В обычной гидрологической практике, основной интерес при исследовании испарения уделяют определению его суточных, месячных, сезонных, годовых и многолетних значений или их норм. Последние (нормы суммарного испарения) часто используются при воднобалансовых расчетах. Однако обеспеченные значения суммарного испарения с суши также рекомендуют использовать при решении некоторых специфических гидрологических задач. Так сотрудницей ГГИ Л. Г. Бавиной была предложена расчетная схема получения обеспеченного водного баланса неосушенных болот, в которой обеспеченное значение стока $Q_p\%$ определяется разностью осадков той же обеспеченности ($X_p\%$) и испарения, обеспеченностью $(100-P)\%$, т. е. с использованием обеспеченных значений испарения. Обеспеченные значения суммарного испарения с суши по рекомендациям С. В. Сольского следует учитывать при расчете гидрологических характеристик техногенно-нагруженных территорий. Они также используются при выборе пункта и площадки атомных электростанций: месячные и годовые суммы испарений с водной поверхности и с поверхности суши.

Проблемы возникают в связи с глобальными изменениями климата, происходящими в последние десятилетия. С появлением сценарных оценок элементов климата (температура воздуха, осадки) стала актуальной задача долгосрочной оценки последствий изменений климата для различных отраслей экономики. Повышение глобальной приземной температуры воздуха (как одного из аспектов изменений климата на Земле) приводит, с одной стороны, к увеличению объема суммарного испарения с суши (с речных бассейнов), а с другой стороны, к увеличению количества осадков, вследствие усиления испарения с поверхности океана.

Исследования, выполненные на кафедре гидрофизики и гидропрогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета, выявили существование функциональной связи между фрактальной размерностью рядов среднесезонного

годового стока и климатической нормой приземной температуры воздуха. Фрактальная размерность стока, при норме температуры воздуха больше +20 °С, принимает дробное значение в диапазоне от 1 до 2. Такие нормы характерны почти для всей территории Африки. Следовательно, для вероятностного описания процесса формирования годового стока на африканском континенте необходимо учитывать только два фактора расходной части уравнения водного баланса. Для Африки, в качестве второго фактора после стока, выступает суммарное испарение с поверхности речных бассейнов. Такая роль приписывается суммарному испарению неслучайно, так как большинство речных бассейнов в Африке относится к бассейнам первого типа по классификации Э. М. Ольдекопа, для которых основное влияние на сток оказывает суммарное испарение с бассейна. В среднем для Африки, суммарное испарение за год составляет больше 70 % от годовой суммы осадков.

Исследованиями моделей формирования многолетнего стока (ведущих к распределениям из класса К. Пирсона) на устойчивость (работы сотрудников кафедры гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ и аспирантов из Африки Куасси Би Гессан Арман и Куасси Куаме Модест – Кот Д'Ивуар; Хамлили Абделатиф – Алжир) было установлено, что, в рамках одномерного вероятностного описания многолетнего стока путем аппроксимации распределения $p(Q)$ системой дифференциальных уравнений для начальных моментов, формирование стока в бассейнах обширных территорий юга России, США и практически всей Африки не устойчиво по коэффициенту асимметрии, а часто и по коэффициенту вариации. Причем для большинства климатических сценариев неустойчивость сохраняется, а иногда и усугубляется. Одним из способов борьбы с этим явлением является учет дополнительной фазовой переменной, т. е. переход к двумерным распределениям $p(Q, E)$, где E – испарение. Первой попыткой в этом направлении была диссертация Ф. Л. Соловьева (защитился в РГГМУ в 2010г.) Однако в его работе использовались только условные распределения $p(Q/E)$ и только для территории России.

Таким образом, имеется определенный набор задач, в которых требуется использовать не только распределения $p(Q)$, но и $p(E)$, а также $p(Q/E)$. Имеется также определенный опыт по генерации многолетних рядов испарения. Наличие этих двух обстоятельств актуализирует сформированную тему исследований.

Цели и задачи исследования. Целью данного исследования является разработка и адаптация к условиям Африки методики сценарной оценки вероятностных характеристик многолетнего испарения с речных бассейнов Африки.

Для достижения подставленной цели были решены перечисленные ниже основные задачи:

- обоснованно выбран метод расчета годового испарения с речных бассейнов Африки;

- создана база данных по климатическим элементам (приземная температура воздуха, осадки), используемых для расчета испарения;

- осуществлены генерирование и статистическая обработка рядов суммарного годового испарения по выбранному методу (оценка расчетных характеристик испарения);

- выполнено картирование основных расчетных статистических характеристик суммарного годового испарения;

- реализованы ретроспективные и сценарные прогнозы вероятностных характеристик многолетнего испарения.

Методика исследования и исходный материал. Достижение основной цели исследования основано на адаптации к испарению модели долгосрочной оценки вероятностного распределения многолетнего речного стока, разработанной на кафедре гидрофизики и гидропрогнозов. Исторические данные (фактические) о температуре воздуха и осадках получены из архива данных национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) Соединенных Штатов Америки (США); а сценарные – из отчета четвертого доклада (CMIP4) Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC).

Расчеты выполнены в среде *Microsoft Excel* и при построении карт были использованы компьютерные программные обеспечения *ArcView* и *Surfer*.

Научная обоснованность и достоверность. Научная обоснованность проведения данного исследования заключается в том, что рассчитанные фрактальные размерности многолетнего речного стока для Африки меняются от 1 до 2. Следовательно, в процессе формирования вероятностного распределения речного стока в Африке активно участвует дополнительная фазовая переменная, в качестве которой выступает суммарное испарение с речных бассейнов.

Результаты (оценки характеристик и гидрологические карты) и сделанные основные выводы в ходе исследования, получились в рамках, существующих в настоящее время, гидрологических нормативов и базируются на моделях, прошедших широкую апробацию почти на всех континентах.

Научная новизна и практическая значимость. По ходу решения задач настоящего исследования были получены следующие основные результаты:

1. Создана база данных (фактические и сценарные) о температуре воздуха и осадках на 356 гидрометеорологических станциях в Африке; впервые сгенерировано и статистически обработано столько же рядов суммарного годового испарения с речных бассейнов.

2. Обновлено карты статистических характеристик (нормы, коэффициента испарения, и т.д.) фактического суммарного испарения для Африки, построенные российскими учеными в 1970х годах.

3. Впервые для Африки получена региональная зависимость нормы коэффициента суммарного испарения от норм метеорологических факторов (температуры воздуха и осадков) и впервые разработана методика долгосрочного прогнозирования вероятностного распределения многолетнего испарения.

4. Впервые (на примере Африки) произведен сравнительный анализ фактических и условно-прогнозных (ретроспективных) вероятностных распределений испарения, показывающий приемлемость методики на 5 %-ом уровне значимости.

5. Впервые получены и проанализированы распределения по территории Африки многолетних характеристик сценарных значений испарения.

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 переданы в метеорологическую службу Республики Мали для внедрения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты генерирования рядов суммарного годового испарения с речных бассейнов Африки и их статистической обработки, включая оценку трендов на значимость и проверку их

(рядов) на однородность по объективным критериям Фишера и Стьюдента.

2. Пространственное распределение по территории Африки нормы фактического суммарного испарения с речных бассейнов и оценка погрешности построенной карты.

3. Методика долгосрочной оценки вероятностного распределения многолетнего суммарного испарения в Африке и региональная зависимость нормы коэффициента испарения от норм температуры воздуха и осадков.

4. Ретроспективные прогнозы и результаты проверки на согласие расчетных вероятностных распределений многолетнего испарения с фактическим распределением.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на заседаниях Итоговой секции Ученого Совета РГГМУ в 2014 и 2015 гг., и семинарах кафедры гидрофизики и гидропрогнозов гидрологического факультета РГГМУ. Также промежуточные результаты работы были представлены на конференциях, в том числе: XXIV и XLI международные заочные научно-практические конференции 2013 и 2014 гг. «Технические науки – от теории к практике» (г. Новосибирск), XVI «Международная научно-практическая конференция» 2014 г. (Институт стратегических исследований) (г. Москва), VIII всероссийская научная экологическая конференция «Вода – источник жизни на Земле» 2015 г. (Санкт-Петербург), XI международный Большой географический фестиваль (БГФ-2015) «Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета» (Санкт-Петербург), и *International Conference on Engineering Technology, Engineering Education and Engineering Management* 2014 в Китае (*China*).

По теме диссертации опубликовано 10 статей, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 в зарубежных изданиях (1 – в высокорейтинговом журнале).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и 8 приложений. Работа изложена на 190 страницах и включает 34 рисунок и 16 таблиц. Список использованных источников состоит из 83 источников российских и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследовательской работы, исходя из результатов и выводов ранее проделанных исследований по тематике диссертации.

Первая глава посвящена описанию физико-географических условий формирования многолетнего режима стока и испарения.

Африканский континент делится экватором на две почти равные части, что объясняет повторение климатических поясов (на нем) на одних и тех же широтах в обоих полушариях. По генетической классификации климатов, предложенной Б. П. Алисовым, в Африке различаются следующие климатические пояса: экваториальный, субэкваториальный, тропические (влажный и сухой) и субтропический. В режиме увлажнения территории Африки основную роль играют атмосферные жидкие осадки. В среднем по территории за год выпадает примерно 700 мм осадков. В тропическом поясе Африки испаряемость максимальна, и может достигать 3000 мм и больше в год. Но здесь испарение лимитируется осадками, и всего испаряется порядка 100 – 200 мм воды в год. Поэтому в тропических поясах наблюдаются аридные условия увлажнения. В экваториальном климате испаряемость практически равна испарению.

В результате районирования территории Африки по критериям устойчивости, рассчитанным по рядам среднегодовых расходов воды (см. рисунок 1), выявлены неустойчивости второго ($\beta > 1$) и третьего ($\beta > 0,67$) моментов. Это стимулировало проведение фрактальной диагностики рядов среднегодовых расходов воды и рядов суммарного годового испарения. Рассчитаны фрактальные размерности многолетних рядов годового стока и испарения по 24 станциям и получено, что в 70 % случаев размерность рядов стока совпадает с размерностью рядов испарения; кроме того, выявлена территориальная группировка размерностей. Таким образом, показана возможность использования испарения в качестве дополнительной переменной в устойчивой модели формирования годового стока в Африке. Данные выводы открывают возможность разрабатывать для Африки модели прогнозирования стока в виде уравнения ФПК для двухмерной плотности вероятности $p(Q, E)$. Однако первоочередной задачей является предварительное освоение модели для эволюции одномерного распределения $p(E)$. В связи с

этим фактами была сформулирована цель и поставлены задачи диссертации, указанные выше.

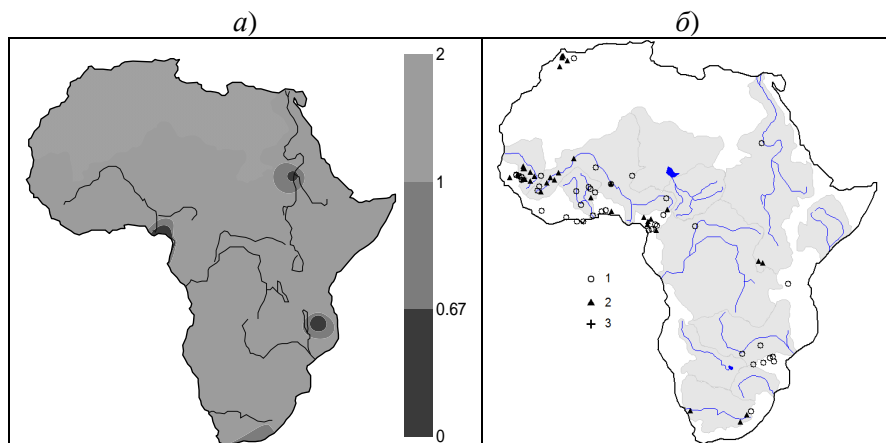


Рис. 1. Пространственное распределение критерия устойчивости (а) и размерности пространства вложения (б) рядов среднегодовых расходов воды на реках Африки.

Во второй главе были проанализированы существующие в настоящее время основные способы определения суммарного испарения с поверхности суши как российские, так и зарубежные. Рассмотренные в этом разделе методы генерирования рядов суммарного испарения перечислены ниже:

- расчет испарения по уравнению водного баланса;
- расчет испарения по уравнению связи М. И. Будыко;
- метод П. С. Кузина;
- расчет испарения по температуре воздуха и парциальному давлению (упругости водяного пара): метод А. Р. Константинова;
- расчет испарения по уравнению Тюрка;
- расчет испарения по методу Пенмана–Монтейна;
- расчет испарения по методу Кутаня.

Результаты анализа методов расчета суммарного испарения показали, что для природных условий Африки (с учетом доступных существующих гидроклиматических данных) можно применять метод Тюрка с минимумом погрешности, для которого требуются температура воздуха и осадки, как показывает формула (1):

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

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

Критериями выбора данного метода генерирования норм годовых значений испарения с поверхности речных бассейнов Африки служили, во первых, симметричность распределения ошибки (невязки) (с нулевым математическим ожиданием) относительно метода водного баланса (см. рисунок 2), и во вторых наличие требуемых метеорологических данных, то есть наличие рядов годовых сумм осадков и средней годовой температуры воздуха.

Поэтому была сформирована база данных многолетних рядов по температуре воздуха и осадкам продолжительностью 40 лет, с 1951 по 1990 г., для 356 гидрометеорологических станции на территории Африки, а также были сгенерированы ряды многолетнего суммарного испарения.

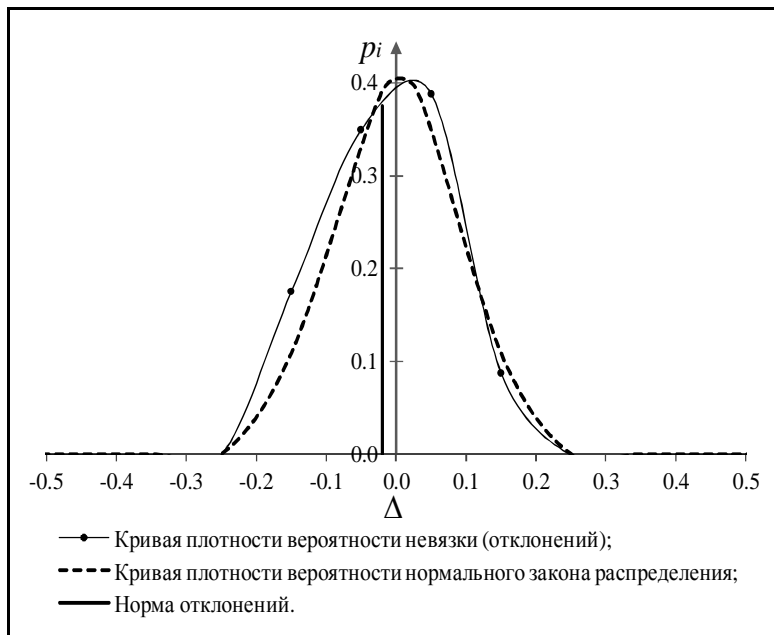


Рис. 2. Кривая плотности вероятности распределения невязки.

В третьей главе была произведена статистическая обработка рядов суммарного годового испарения и картирование расчетных гидрометеорологических характеристик. Она выполнялась в рамках, существующих в настоящее время, норм и правил при определении основных расчетных гидрологических характеристик (СП 33-101-2003). Были выполнены следующие этапы:

- проверка наличия цикличности (периодичности) в рядах испарения и визуальная оценка наличия резко отклоняющихся значений;

- проверка рядов на однородность (стационарность) по статистическим критериям Фишера и Стьюдента;

- определение (т. е. расчет), по общеизвестным статистическим формулам, основных расчетных гидрометеорологических характеристик рядов суммарного годового испарения (норма, коэффициенты вариации и асимметрии, и т. д.) и оценка их погрешности;

- картирование полученных значимых гидрологических характеристик многолетних рядов испарения.

На некоторых хронологических графиках суммарного годового испарения наблюдались тренды. Поэтому они были проанализированы на значимость и в результате получено, что на 5 %-ом уровне значимости 47,5 % рядов испарения обладают значимым трендом. При таком же уровне значимости однородными оказались 52,2 % и 88,1 % рядов испарения по среднему значению (по критерию Стьюдента) и дисперсии (по критерию Фишера) соответственно.

Картирование производилось при помощи ГИС-технологии; причем сначала был оценен радиус корреляции в результате построения и анализа пространственной корреляционной функции (и ее аналитической аппроксимации). Он составляет 3052 км, что превышает максимальное расстояние между соседними станциями, которое равно 2645 км. В качестве примера, на рисунке 3 приведены карты пространственного распределения нормы и коэффициента вариации суммарного годового испарения с бассейнов рек Африки.

Анализ карты (а) на рисунке 3 показывает соответствие распределения испарения физическим условиям территории, т. е. испарение больше там (в центральной части), где больше осадков и выше годовые температуры воздуха. Наблюдается примерно широтное изменение слоя суммарного годового испарения. Максимальное значение испарения за год наблюдается в

центральной части Африки и может достигать 1500 мм. Норма испарения постепенно уменьшается по мере удаления от экватора к тропикам, где годовое испарение с речных бассейнов составляет от 200 до 400 мм. В самых жарких тропических областях континента коэффициент испарения максимален, иногда превышает 0,8. Ошибка определения нормы суммарного годового испарения по данной карте оценивается в пределах $\pm 15\%$.

Что касается вариации (C_v), изменчивость испарения во времени незначительна в центральной Африке, где значение коэффициента вариации сравнительно невелико (от 0,02 до 0,04). Отмечается также небольшая часть западной Африки с пониженным коэффициентом вариации суммарного годового испарения.

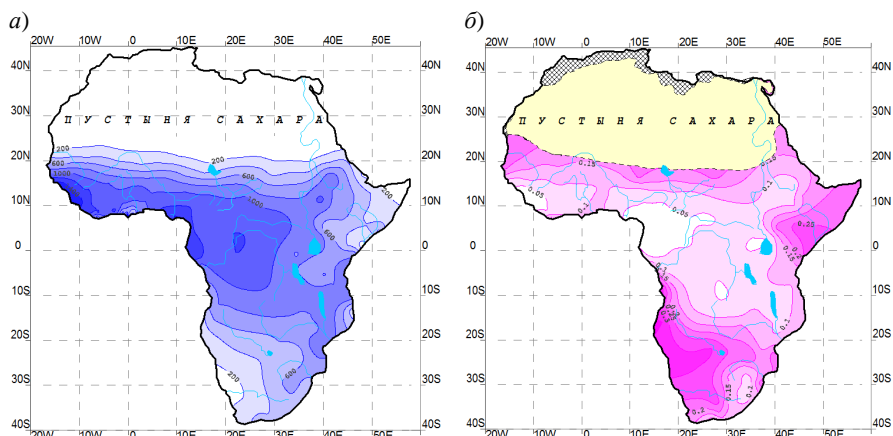


Рис. 3. Пространственное распределение нормы (а) и коэффициента вариации (б) суммарного годового испарения по территории Африки.

Полученные в данной главе карты были использованы для параметризации модели сценарной оценки вероятностного распределения многолетнего годового испарения в последней главе.

Четвертая глава, основная для данного исследования, посвящена разработке методики долгосрочной оценки вероятностных распределений многолетнего годового испарения Африки.

Вначале выполнено описание прототипа (математический аппарат) методики долгосрочной оценки вероятностных распределений, уже используемого для территории Российской Федерации. Методика основана на уравнении ФПК (Фоккера–

Планка–Колмогорова), динамической основой которого является дифференциальное уравнение (2):

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{1}{k\tau}Q + \frac{\dot{X}}{\tau}, \quad (2)$$

где τ – эффективное время релаксации; Q – расход воды в замыкающем створе; k – коэффициент стока (может быть постоянным или зависеть от метеорологических факторов или факторов подстилающей поверхности); \dot{X} – внешнее воздействие в виде осадков на водосбор.

В результате стохастического обобщения уравнения (2) и обоснованных допущений и упрощений уравнения ФПК получается прогностическая модель вероятностного распределения испарения в следующем виде:

$$\begin{aligned} -\bar{c}m_1 + \bar{N} &= 0; \\ -\bar{c}m_2 + 2\bar{N}m_1 + G_{\bar{N}} &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\bar{c} = 1/k_E\tau$; $\bar{N} = \bar{X}/\tau$; k_E – коэффициент испарения; τ – время релаксации речного бассейна (для многолетнего испарения (или стока) $\tau = 1$ год); $G_{\bar{N}}$ – интенсивность внешнего шума; \bar{X} – интенсивность осадков; m_1 , m_2 – первый и второй начальные моменты соответственно. Эта модель использована в самом упрощенном виде, который практически исключает неустойчивость. Третий момент отдельно не вычислялся, но при построении прогнозных (сценарных) кривых обеспеченностей коэффициент асимметрии (C_s) использовался исходя из фиксированного соотношения C_s/C_v для каждого конкретного створа, а также в варианте осредненных значений.

Методика была проверена на ретроспективном материале. Для этого был использован 21 ряд суммарного испарения. Эти ретроспективные ряды имеют две стационарные (однородные) половинки, которые неоднородны (по критериям Фишера и Стьюдента) относительно друг друга. Автокорреляционные функции ретроспективных рядов испарения не дали определенную типовую форму.

Алгоритм ретроспективных прогнозов характеристик испарения содержит следующие этапы:

Этап 1 – параметризация модели. Ряды разбивались на две части. По одной половине делалась параметризация модели, т. е. по данным о годовых значениях испарения и о годовых осадках рассчитывались значения начальных моментов, коэффициентов вариации и испарения (k_E). Далее определялись параметр \bar{c} , обратный коэффициенту испарения, и обратным пересчетом системы (3) – интенсивность климатического шума $G_{\tilde{N}}$.

Этап 2 – долгосрочный прогноз. Зная $G_{\tilde{N}}$ (из предыдущего этапа), норму осадков и параметр \bar{c} за вторую половину ряда, путем решения системы (3) рассчитываются прогнозные значения моментов m_i . От моментов уже можно перейти к прогнозным оценкам статистических характеристик вероятностного распределения (норма = m_1 , C_V и C_S). Коэффициент асимметрии определяется по соотношению C_S/C_V , а коэффициент вариации по следующей формуле:

$$C_V = \frac{\sqrt{m_2 - m_1^2}}{m_1}, \quad (4)$$

Были выполнены прямые и обратные ретроспективные прогнозы при трех вариантах задания прогнозных значений коэффициента испарения (k_E): а) – при постоянном коэффициенте испарения ($k_E = \text{const}$); б) – при зависимости коэффициента испарения от температуры воздуха и осадков [формула 5, $k_E = f(T, X)$] и в) – с фактическим для того периода, на который давался прогноз, коэффициентом испарения ($k_E = k_{\text{факт}}$).

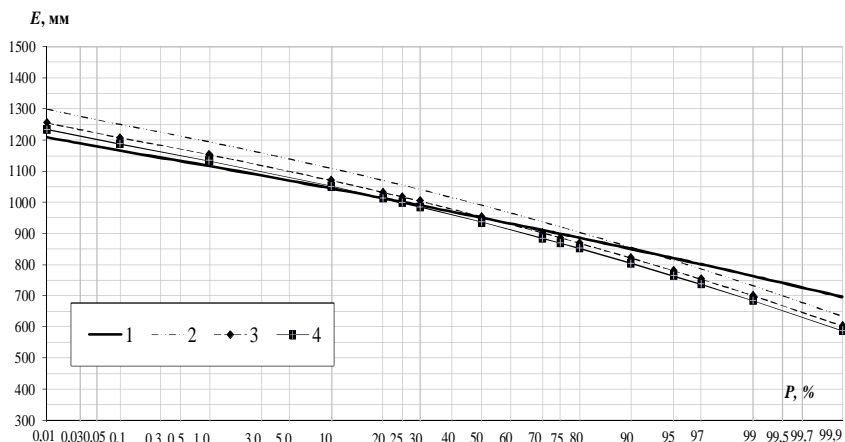
Методом наименьших квадратов получена следующая зависимость коэффициента испарения (k_E) от норм метеорологических элементов (осадки и температура воздуха):

$$k_E = 0,33 - 4,03 \cdot 10^{-6} X^{1,5} + 0,13 T^{0,5}, \quad R = 0,96 \quad (5)$$

где X , T – нормы осадков и температуры воздуха; R – коэффициент множественной корреляции.

В результате ретроспективных прогнозов, были получены прогнозные моменты вероятностного распределения (m_1 , m_2), следовательно, норма, коэффициенты вариации и асимметрии, что позволило построить аналитические прогнозные и фактические кривые обеспеченности (использовались кривые Пирсона III типа), которые сравнивались по критериям согласия. Пример таких кривых показан на рисунке 4.

а)



б)

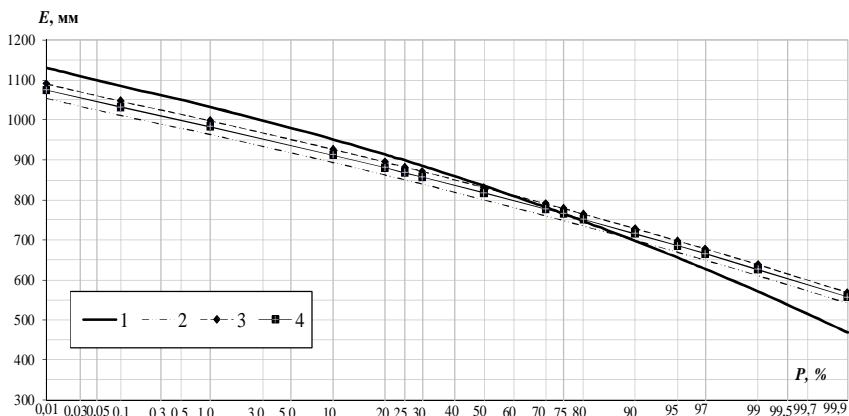


Рис. 4. Фактическое (1) и прогнозные (2 – $k_E = \text{const}$, 3 – $k_E = k_{\text{факт}}$ и 4 – $k_E = f(X, T)$) кривые обеспеченности испарения с водосбора реки Chari, пост Vousoo (станция № 116): а – прямой ретроспективный прогноз, б – обратный ретроспективный прогноз.

Оценка эффективности ретроспективных прогнозов (т. е. проверка соответствия прогнозных кривых фактическим) производилась по критерию согласия Колмогорова и по интегральному критерию согласия Пирсона (χ^2). Результаты проверки согласия показали, что для варианта функциональной зависимости $k_E = f(T, X)$, 87,5 % (по критерию Колмогорова) и 52,5 % (по критерию χ^2) оправдавшихся прогнозов при 5 %-ом уровне значимости. Оправдываемость ретроспективных прогнозов несколько выше при варианте $k_E = k_{\text{факт}}$ (87,5 % по критерию Колмогорова и 62,5 % по критерию χ^2). Но при использовании фактических рассчитанных значений соотношения C_s/C_v за прогнозный период (а не районных значений как в данном исследовании), оправдываемость прогнозов стремится к 100 %. Это говорит о надежной работоспособности методики при правильном задании параметров.

На последнем этапе данной главы были выполнены сценарные оценки суммарного испарения с речных бассейнов Африки на основе апробированной методики и имеющихся сценарных норм суммы годовых осадков и среднегодовой температуры воздуха по модели *UKMO-HADCM3* для сценариев *Commit*, *SRA1B*, *SRA2* и *SRB1*. Данные об осадках и температуре воздуха были взяты из четвертого доклада (*CMIP4 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 4*) Межправительственной группы экспертов по изменению климата (*IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change*). Они находятся в свободном доступе на сайте Центра распространения данных (*DDC – Data Distribution Centre*).

В результате получены, закартированы и проанализированы сценарные оценки различных статистических характеристик суммарного годового испарения. Например, распределение нормы по сценарию *Commit* показало увеличение нормы суммарного годового испарения на 10,3 % в среднем по территории относительно фактической за период с 1951 по 1990г. Более заметно увеличение в центральной части материка.

Выделяется хорошо выраженная географическая закономерность: ожидается уменьшение нормы испарения в западной части Африки (в бассейне реки Сенегал), а также в восточной и в небольшой части Южной Африки; положительное отклонение (увеличение нормы испарения) наблюдается на большей части, примерно 2/3 территории.

Для наглядности изменения нормы суммарного годового испарения по территории были рассчитаны относительные изменения $\Delta E = (E_{\text{сцен}} - E_{\text{факт}})100\%/E_{\text{факт}}$, где $E_{\text{факт}}$, $E_{\text{сцен}}$ – фактическая и сценарная нормы суммарного испарения. Географическое распределение по территории Африки относительного изменения испарения при климатическом сценарии *Commit* представлено на рисунке 5.

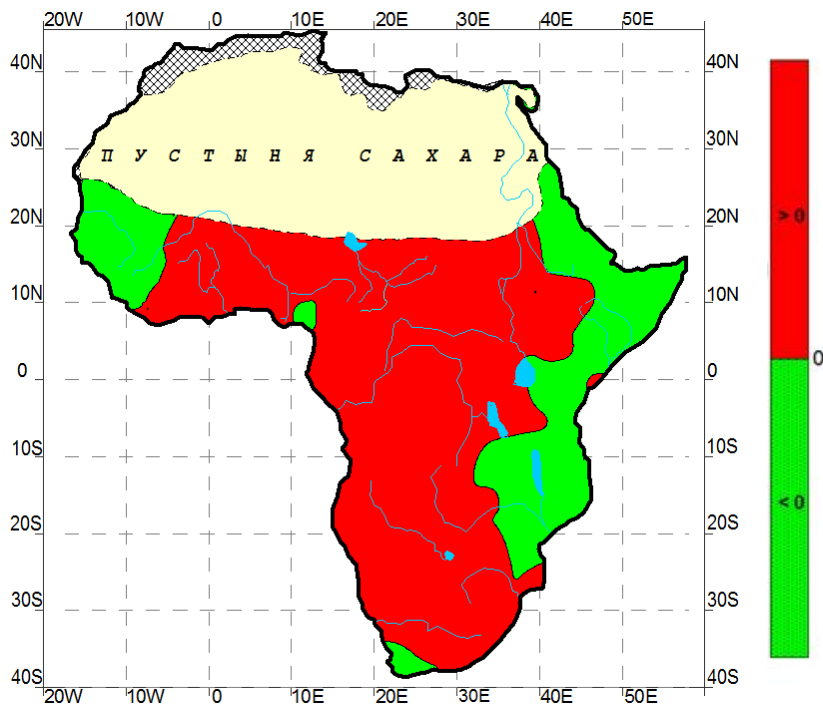


Рис. 5. Пространственное распределение ΔE (по знаку) при сценарии *Commit*.

Сравнение осредненных по территории статистических характеристик фактического и сценарных вероятностных распределений произведено в таблице.

Анализ таблицы показывает, что например, для климатического сценария *Commit* в среднем по территории Африки при увеличении норм температуры воздуха на 6,7 % и осадков на 13,1 %, объем испаряющейся воды увеличится на 10,2 %, а временная изменчивость при этом (т. е. коэффициент вариации) уменьшится на 20,7 %. Коэффициент испарения почти не меняется, а самое

значительное изменение наблюдается для коэффициента асимметрии, который уменьшится в три раза.

Таблица

Средние значения по территории гидрометеорологических характеристик Африки

Характеристика	Фактические оценки (1951 – 1990)	Изменение сценарной оценки (2040 – 2069) относительно фактической, Δ , %			
		<i>Commit</i>	<i>SRA1B</i>	<i>SRA2</i>	<i>SRB1</i>
T , °C	23,7	6,7	14,0	14,2	11,6
X , мм	1049	13,1	9,5	13,8	10,2
E , мм	797	10,2	11,7	13,0	10,6
k_E	0,84	-1,7	1,4	0,2	0,4
C_v	0,17	-20,7	-13,5	-15,1	-12,5
C_s	0,02	-309,7	-244,3	-235,9	-252,2

Рассчитаны и построены сценарные вероятные распределения суммарного годового испарения. Результаты их сравнения с фактическим распределением показывают, что ожидается увеличение обеспеченных значений испарения и ожидаемые увеличения возрастают с вероятностью превышения; так при 0,01 %-ой обеспеченности увеличение составляет от 0,3 % (при *Commit*) до 5,5 % (при *SRA2*). А при 99,9 %-ой обеспеченности – от 24,4 % (*SRB1*) до 34,1 % (*Commit*), в то время как увеличение нормы находится в интервале от 10,2 % до 13,0 %. Следовательно, можно сделать вывод о том, что большие значения испарения (малообеспеченные значения) менее чувствительны к изменениям климата, чем норма.

В заключении приведены основные результаты проделанного исследования. В ходе выполнения диссертации получены следующие результаты:

1. Создана региональная база данных для Африки, включающая многолетние ряды по годовой сумме осадков и среднегодовой температуре воздуха на 356 гидрометеорологических станциях. Продолжительность рядов составляет 40 лет и период наблюдения с 1951 по 1990 г.

2. Был найден наилучший метод оценки фактического суммарного испарения с речных бассейнов Африки из множества существующих методов. Таковым оказался метод Тюрка, который дает примерно

такие же значения испарения, как и метод водного баланса, который применим для Африки в его классическом виде по причине из глубокого залегания подземных вод и незначительности других видов потери воды.

3. Сгенерированы ряды суммарного годового испарения, выполнена проверка их на стационарность (однородность) по статистическим критериям Фишера и Стьюдента. Рассчитаны основные статистические характеристики испарения, которые закартированы и проанализированы. Основным выводом отсюда является то, что наблюдается примерно широтное изменение характеристик суммарного испарения по территории Африки.

4. Выполнены ретроспективные прогнозы, в процессе которых получена для Африки региональная зависимость нормы коэффициента испарения от норм суммы годовых осадков и среднегодовой температуры воздуха.

5. Выполнены долгосрочные сценарные оценки характеристик вероятностного распределения суммарного годового испарения на основе ожидаемых оценок температуры воздуха и осадков для четырех климатических сценариев. Проведено сравнение ожидаемых сценарных и фактических оценок характеристик испарения, в результате чего выявлена четкая географическая закономерность их повышения и понижения.

Список публикаций по теме диссертации:

В журналах, входящих в список ВАК:

1. Устойчивость формирования многолетнего стока и фрактальная диагностика рядов расхода воды и испарения африканского континента // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, 2015, № 38.– с 51–59. (в соавторстве с Дехтяревым А. А.).

2. Определение статистических характеристик многолетних рядов годового испарения (на примере бассейна р. Обь) // Естественные и технические науки, 2014, № 12.– с 50–56. (в соавторстве с Коваленко В. В., Гайдуковой Е. В., Дехтяревым А. А.).

3. Сценарная оценка суммарного испарения с поверхности речных бассейнов Африки // Естественные и технические науки, 2015, № 4 (82).– с 104–106.

В других журналах:

4. Максимальный сток весеннего половодья при оценке надежности гидротехнических сооружений при изменении климата // Технические науки – от теории к практике, (XXIV международная

заочная научно-практическая конференция), 2013, № 24.– с 146–153. (в соавторстве с Коваленко В. В., Гайдуковой Е. В., Хаустовым В. А., Шевниной Е. В., Судаковой Н. В).

5. 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., Бонгу Э.).

6. 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., Бонгу Э.).

7. 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.– 300 с. (в соавторстве с Судаковой Н. В., Бонгу Э. С.).

8. 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. (в соавторстве с Бонгу С. Э., Люсьеном С.).

9. *Assessment of changes in characteristics of runoff of Africa for various climate scenarios // International Conference on Engineering Technology, Engineering Education and Engineering Management, China.* – 2014, 21–23. (в соавторстве с V. V. Kovalenko, E. V. Gaidukova, M. Kuassi, E. S. Bongu).

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

Отпечатано с готового оригинал-макета

Лицензия ЛР № 0203090 от 30.12.96

Подписано в печать с оригинал-макета
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Уч.-изд. л. 1,0. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №

РГГМУ, 195196, СПб, Малоохтинский пр. 98