

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи
УДК [556.16.06:51-7](470.2)

Куасси Куаме Модест

**СЦЕНАРНАЯ ОЦЕНКА ДОЛГОСРОЧНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ
ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЛЕТНЕГО СТОКА
ЮГО-ЗАПАДНОЙ АФРИКИ**

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 В.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Российского государственного гидрометеорологического университета.

Научный руководитель:

- Гайдукова Е.В., кандидат технических наук, доцент Российского государственного гидрометеорологического университета.

Официальные оппоненты:

- Мешерская А.В., доктор географических наук, заведующая лабораторией Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.
- Соловьев Ф.Л., кандидат технических наук, начальник сектора гидрологии отдела инженерных изысканий ЗАО «Ленгипроречтранс».

Ведущая организация:

- Институт Озероведения РАН.

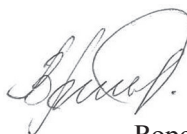
Защита диссертации состоится 8 октября 2015 г. в 15:30 на заседании специализированного совета Д212.197.02 Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

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 8 сентября 2015 г.

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



Воробьев В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В результате хозяйственной деятельности на речных водосборах и вариаций климата антропогенного и естественного характера происходят изменения вероятностных характеристик многолетних видов речного стока. В мировой науке делаются попытки оценить подобные изменения гидрологического режима, однако в основном это касается только многолетних норм речного стока. В РГГМУ разработана методика сценарных оценок и более старших моментов вероятностных распределений, однако ее применение для условий Африки до недавнего времени было проблематичным. Причина заключается в том, что при высоких температурах воздуха, вызывающих существенные потери стока на испарение, статистические моменты неустойчивы, что приводит к неопределенности сценарных оценок обеспеченных расходов воды. Попытки привлечь дополнительные фазовые переменные, число которых определяется фрактальной диагностикой, хотя и обеспечивают устойчивость моментов, но само их выделение из многомерных распределений очень трудоемкая задача и ее решение пока не доведено до массового практического применения. Относительно успешная попытка такого рода сделана для условных распределений плотности вероятности расхода воды в предположении, что вторая переменная – испарение – фиксируется на уровне нормы (диссертация защищена в РГГМУ Ф. Л. Соловьевым в 2009 г.).

Для физико-географических условий Африканского континента, с точки зрения массовых инженерных расчетов, оказался более приемлемым путь не усложнения модели формирования стока, а ее упрощения путем адаптации к относительно слабо изученному многолетнему режиму речного стока, которому присущи неустойчивые старшие моменты. Подобный шаг впервые сделал д-р Абделатиф Хамлили из Алжира (диссертация защищена в РГГМУ в 2012 г.).

Таким образом у африканских гидрологов появился инструментарий для проведения устойчивых сценарных оценок характеристик многолетнего стока, что актуализировало решение подобной задачи не только для Северной Африки, где расположен Алжир, но и для Юго-Западной, где имеется довольно густая речная сеть (для Восточной Африки подобная задача не актуальна из-за отсутствия такой густоты речной сети и малого числа пунктов измерения стоковых характеристик).

Цели и задачи исследования. Целью исследования является формирование информационно-технологической базы для адаптации существующей в России методологии сценарных оценок гидрологических характеристик при изменении климата к условиям Юго-Западной Африки, а также для выявления географических закономерностей появления аномально опасных зон полей многолетнего годового речного стока.

Для достижения сформулированной цели решены следующие задачи:

– созданы базы данных по годовому стоку, осадкам и приземной температуре воздуха по 144 пунктам наблюдений на территории Юго-Западной Африки;

– с использованием стандартных методик, принятых в России, сформированы ряды многолетнего годового стока, удовлетворяющие критериям статистической обработки, и вычислены расчетные гидрологические характеристики для дальнейшего картирования и использования при оценке степени устойчивости начальных моментов вероятностных распределений многолетнего годового стока;

– рассчитаны критерии устойчивости начальных моментов и с использованием ГИС-технологий закартированы совместно со всеми гидрологическими характеристиками, необходимыми для проведения расчетов по получению сценарных оценок;

– для климатических сценариев Commit, SRA1B, SRA2, SRAB1 получены и закартированы оценки расчетных гидрологических характеристик на 2040–2069 гг. для Юго-Западной Африки, включающей 35 государств;

– выявлены и закартированы зоны статистически значимых отклонений (аномалий) прогнозных характеристик от фактических и сделаны оценки (качественного характера) возможных последствий для экономики появления аномальных зон;

– выполнена качественная оценка возможных последствий изменения климата для ряда водозависимых отраслей экономики и проведена количественная оценка оптимальной плотности режимной гидрологической сети для условий существующего и ожидаемого климата.

Методика исследований и исходный материал. Решение поставленных задач основывалось на методологии частично инфинитного моделирования, разработанной в России и применяемой в странах Латинской Америки и Африки с жарким климатом. В основе данной методологии лежит модель формирующего фильтра, которая может ме-

няться как в сторону усложнения (расширение фазового пространства), так и в сторону упрощения (замена мультипликативных шумов аддитивными), с целью ее адаптации к характеру параметрических шумов, вызывающих неустойчивость, а также к форме представления существующих климатических сценариев.

Также применялась методика оптимизации режимной гидрологической сети, разработанная в бывшем СССР профессором И. Ф. Карасевым.

Исследования проводились на персональном компьютере на базе среды разработки *Visual Basic 6* и *C++ Builder*.

Исходным материалом для проведения расчетов служили ряды гидрометеорологических элементов, опубликованные в изданиях Всемирной метеорологической организации, включая Интернет-ресурсы.

Научная обоснованность и достоверность результатов работы основывается на использовании в качестве модели формирования вероятностных распределений многолетнего годового стока широко апробированного и используемого в гидрометеорологии уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК). В стационарном случае его решением является семейство кривых распределений К. Пирсона, которые (распределение Пирсона III типа и его модификация, предложенная С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем) применяются в инженерной гидрологии. Для оценки промежуточных результатов расчетов использовались широко известные в науке статистические методы, а вся подготовительная работа по формированию информационной базы существующего гидрологического режима, необходимая для параметризации прогностической модели, выполнялась по общепринятым в России методам.

Научная новизна и практическая значимость. В ходе проведенного исследования получены следующие основные результаты.

1. По итогам стандартных процедур, принятых в России (удлинение рядов, проверка наличия многоводных и маловодных фаз, установление факта однородности), сформировано 114 гидрологических рядов многолетнего годового стока, по которым построены карты распределения по исследуемой территории стандартных расчетных гидрологических характеристик, а также распределения коэффициентов стока и автокорреляции при годовой сдвигке (карты для коэффициентов вариации, асимметрии и автокорреляции для Юго-Западной Африки построены впервые).

2. Впервые (для исследуемой территории) построены карты распределения критерия устойчивости начальных статистических моментов и выявлены регионы, в которых многолетний сток при существующем климатическом режиме формируется неустойчиво по коэффициентам вариации и асимметрии.

3. Впервые для Африки вычислены и закартированы значения интенсивности климатических шумов, используемых (в предположении их квазистационарности) в прогностической модели формирования стока для получения сценарных оценок вероятностных стоковых характеристик для четырех наиболее ожидаемых климатических сценариев.

4. Впервые для Юго-Западной Африки оценены долгосрочные последствия климатических изменений для многолетнего годового стока по четырем климатическим сценариям (Commit, SRA1B, SRA2, SRAB1) и выявлены регионы, в которых ожидаются статистически значимые отклонения сценарных оценок расчетных характеристик от их фактических значений.

5. Проведена оценка (на качественном уровне) экономических последствий появления аномальных географических зон с существенным изменением вероятностных характеристик стока, влияющих на водозависимые отрасли экономики 35 государств рассматриваемого региона Африки.

6. Впервые для рассматриваемого региона проведена количественная оценка оптимальной плотности режимной гидрологической сети для условий существующего и ожидаемого климата.

Практическая значимость исследований заключается в получении прогностических карт распределения вероятностных характеристик годового стока, которые могут быть использованы для оценки чувствительности водозависимых отраслей экономики к возможным изменениям климата, при проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений, а также для оптимизации плотности режимной гидрологической сети.

Работа выполнялась в рамках тем «Географические закономерности распределений на территории России аномальных зон формирования экстремальных видов многолетнего речного стока в перспективе долгосрочных климатических изменений» (№ гос. регистрации 01 2012 80083), «Адаптация математических моделей формирования вероятностных характеристик многолетних видов речного стока к физико-географическим условиям России для целей обеспечения устойчи-

ности их решений при моделировании и прогнозировании» (№ гос. регистрации 01 2014 58678), финансируемых Министерством образования и науки РФ, а также госбюджетной темы кафедры гидрофизики и гидропрогнозов «Моделирование и прогнозирование гидрологических процессов». Ее результаты внедрены в учебный процесс подготовки магистров по направлению «Прикладная гидрометеорология» в РГГМУ и переданы для практического применения в Университет Абобо-Аджаме (республика Кот-Д'Ивуар, региональный отдел университетского исследования в г. Далон (URES-DALON)).

На защиту выносятся следующие положения.

1. Информационно-технологическая база, реализующая адаптацию методологии сценарной оценки гидрологических последствий изменения климата к условиям Юго-Западной Африки и количественную оценку оптимальной плотности режимной гидрологической сети для условий существующего и ожидаемого климата.

2. Методика оценки интенсивности климатического шума, его распределение по Юго-Западной Африке и степень привязки к распределению критерия устойчивости расчетных гидрологических характеристик.

3. Гидрологические карты распределения по территории Юго-Западной Африки расчетных характеристик многолетнего годового стока на середину 21 в. для четырех вариантов климатических сценариев Commit, SRA1B, SRA2, SRAB1, реализующих модель HadCM3, для условий различной интенсивности экономического роста стран Африки. (Совместно с уже существующими аналогичными картами для Северо-Западной Африки они дают целостное представление о гидрологических последствиях изменения климата для всей Африки).

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на научной конференции «Водный ресурсы, экология и гидрологическая безопасность», (Институт водных проблем РАН, 2011 г.), на XVI Всероссийской научно-практической конференции «Стратегия устойчивого развития регионов России» (2013 г.), на итоговой сессии Ученого совета РГГМУ (2013, 2014 гг.), на научных семинарах кафедры гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ.

По теме диссертации опубликовано 11 статей (в том числе 3 в изданиях по списку ВАК).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, содержащего 60 источников, 5 приложений. Работа изложена на 152 страницах текста, включая 49 рисунков, 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы и приведена информация о диссертации общего характера.

В первой главе рассматривается современное состояние изученности многолетнего годового стока Юго-Западной Африки, формулируется цель, и ставятся задачи исследования.

Многолетний режим речного стока в Юго-Западной Африке (и вообще в Африке) до последнего времени оценивался, в основном, с использованием карт Мирового водного баланса. Представленные в нем карты многолетнего годового стока и коэффициента стока базируются на предположении статистической стационарности гидрологических рядов и устойчивости начальных моментов вероятностных распределений.

Однако, в связи с подтверждающимся инструментальными наблюдениями потеплением климата возникает вопрос о нарушении стационарности и возможных способах оценки долгосрочных изменений расчетных гидрологических характеристик. Подобный способ (точнее методология) в деталях разработан в РГГМУ на основе модели Фоккера–Планка–Колмогорова для эволюции плотности вероятности интересующей нас стоковой характеристики. Однако попытки применить ее для Африки (как и для южных регионов РФ) не привели к ожидаемым результатам. Причина заключается в том, что в рамках однофазового (стокового) описания гидрометеорологических процессов на речных водосборах старшие моменты вероятностных распределений оказываются неустойчивыми. Эта неустойчивость имеет физическую природу и не связана напрямую с недостаточной длительностью рядов наблюдений, что характерно для Африканского континента.

Для преодоления этой неустойчивости в РГГМУ были разработаны, так называемое, частично инфинитное моделирование и, опирающееся на него, прогнозирование. Его суть заключается в том, что «неустойчивую задачу погружают» в расширенное фазовое пространство, включающее наряду со стоковой характеристикой и другие гидрометеорологические элементы, например, испарение. Пределы подобного расширения определяются методами фрактальной диагностики, которая для Африки была проведена доктором Куасси Арманом (защитился в РГГМУ в 2008 г.). Однако практическое применение многомерных вероятностных распределений затруднено (по нескольким причи-

нам). Поэтому альтернативным способом борьбы с неустойчивостью является не усложнение, а упрощение моделей путем уменьшения в них роли мультипликативных шумов. Для Северо-Западной Африки подобную (успешную) попытку сделал доктор Хамлили Абделатив из Алжира (защитился в РГГМУ в 2011 г.). Однако остался не освещенным сценарными оценками гидрологических последствий изменения климата огромный Юго-Западный регион Африки. Именно эту лагуну и устраняет данная диссертация (с практической точки зрения) и именно этим обстоятельством диктовались цель и задачи, сформулированные выше.

Во второй главе рассматривается методология оценки долгосрочных изменений годового стока. Она базируется на системе дифференциальных уравнений для начальных моментов, которая аппроксимирует уравнение ФПК:

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

где m_i ($i = \overline{1,4}$) – начальные статистические моменты; $\bar{c} = 1/k\tau = \bar{c} + \tilde{c}$ (здесь k – коэффициент стока; τ – время релаксации речного бассейна; \bar{c} – математическое ожидание; \tilde{c} – белый шум); $N = \dot{X}/\tau = \bar{N} + \tilde{N}$ (здесь \dot{X} – интенсивность осадков; \bar{N} – математическое ожидание; \tilde{N} – белый шум); $G_{\bar{c}}$, $G_{\tilde{N}}$ – интенсивность, а $G_{\bar{c}\tilde{N}}$ – взаимная интенсивность шумов.

Так как существующие климатические сценарии носят равновесный характер, то можно принять, что $dm_i/dt = 0$ ($i = \overline{1,4}$) и ограничиться алгебраической системой. Таким образом сценарные оценки делаются ступенчато (по 20–30 лет, которыми представлены и климатические сценарии). Другим серьезным упрощением является отбрасывание момента m_4 , для надежной статистической оценки которого нужны длинные ряды наблюдений, которые для Юго-Западной Африки отсутствуют. По аналогичной причине можно, вместо прогнозирования m_3 , ограничиться использованием в новом климате соотноше-

ния коэффициентов асимметрии и вариации C_s/C_v , которое соответствует текущему климату.

Таким образом система (1) сводится к двум алгебраическим уравнениям:

$$m_1 = \bar{N} / \bar{c}; \tag{2}$$

$$m_2 = (G_{\bar{N}} + 2\bar{N}m_1) / 2\bar{c},$$

которые параметризируются только двумя константами (\bar{c} и $G_{\bar{N}}$), причем одну из них (\bar{c}) существующий научный уровень гидрометеорологии позволяет в новом климате «оживить», связав ее с температурой воздуха и осадками.

Система (1) позволяет найти критерий устойчивости ее решений, который имеет следующий вид:

$$\beta = 2k \ln r + 2, \tag{3}$$

где k – коэффициент стока, r – коэффициент автокорреляции при годовой сдвиге. Формула (3) ниже будет использована для выявления регионов с неустойчивым режимом формирования моментов, а значит и расчетных гидрологических характеристик.

В этой же главе выполнен анализ существующих климатических сценариев.

В третьей главе формируется информационно-технологическая база, реализующая адаптацию рассмотренной методологии сценарной оценки гидрологических последствий изменения климата к условиям Юго-Западной Африки. К имеющимся 114 многолетним рядам годового стока был применен арсенал современных методик анализа с целью обеспечения допустимости их использования для оценки расчетных гидрологических характеристик, подлежащих картированию. Именно карты обеспечивают возможность посеточной параметризации модели и создают интерфейс гидрологической и метеорологической предметных областей. На рис. 1 показан Юго-Западный регион Африки и имеющаяся на нем использованная гидрологическая сеть постов (центры водосборов).

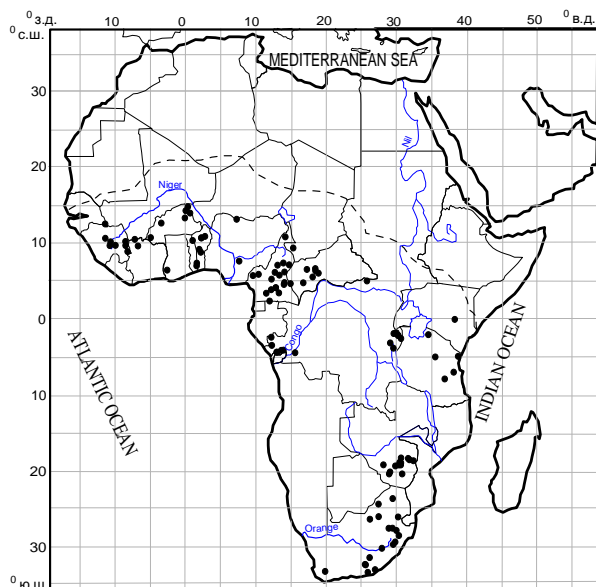


Рис. 1. Юго-Западная Африка (отмечена пунктиром) с нанесенными центрами водосборов (●), замыкаемыми гидрологическими постами.

В таблице представлена информация о некоторых характерных рассмотренных рядах и рассчитанных гидрометеорологических характеристиках.

Таблица

Рассчитанные гидрометеорологические характеристики*

Река – Станция	$F, \text{ км}^2$	$h, \text{ мм}$	Cv	Cs	$r(1)$	k	β	$G_{\bar{N}}$
Milo – Konsankoro	1000	1176	0,37	1,72	0,00	0,74	–	544
Tinkisso – Dabola	1260	372	0,56	1,18	0,35	0,20	1,57	694
Niger – Faranah	3180	903	0,26	0,21	0,04	0,46	–	2460
Milo – Kankan	9620	614	0,28	-0,87	0,07	0,46	–	12142
Niandan – Baro	12770	532	0,15	-0,25	0,15	0,28	0,95	68207
Niger – Kouroussa	18000	446	0,42	1,07	0,40	0,25	1,54	91216
Sankarani – Mandiana	21900	414	0,30	1,12	-0,04	0,24	–	60736
Irane – Koutakoukrou	1250	115	0,76	1,17	0,55	0,11	1,86	212
Alibori-Route Kandi – Banikoara Amont	8170	149	0,63	1,24	0,42	0,14	1,75	8571

Продолжение табл.

Река – Станция	$F, \text{ км}^2$	$h, \text{ мм}$	C_V	C_S	$r(1)$	k	β	$G_{\bar{N}}$
Alibori-Route Kandi – Baniakoara Aval	8170	102	0,50	0,17	0,47	0,10	1,85	3694
Pendjari – Porga	22280	86	0,91	2,88	-0,18	0,08	–	80487
Oueme – Pont De Save	23600	148	0,69	0,58	0,15	0,13	1,53	95201
Oueme – Bonou	46990	130	0,75	1,60	0,04	0,12	1,23	370128
Bagoé – Tombougou	2580	559	0,38	1,14	-0,31	0,41	–	1498
Tano – Alanda	15800	288	0,16	0,17	-0,14	0,20	–	5673
Faleme – Gourbassy	15000	263	0,57	0,49	0,68	0,22	1,83	48036
Bafing – Daka Saydou	15500	485	0,37	0,13	0,35	0,39	1,16	40933
Sankarani – Selingue	34200	335	0,34	0,07	0,63	0,21	1,81	149229
Sankarani – Gouala	35300	289	0,63	1,21	0,20	0,18	1,41	464317
Koulountou – Gue Du P.N.N.K.	5350	206	0,33	-0,27	0,48	0,16	1,77	1735
Gambia – Gouloumbou	42000	164	0,47	0,07	0,68	0,13	1,89	159120
Black Volta – Banzo	2816	127	0,40	-0,01	0,38	0,11	1,79	383
Comoe – Diarabakoko	2350	135	0,59	0,56	0,48	0,11	1,84	633
Leraba – Yendere	5930	176	0,59	0,65	0,44	0,14	1,77	5510
Comoe – Folonzo	9480	82	0,41	-0,19	0,50	0,07	1,90	2985
Black Volta – Nwokuy	14800	57	0,55	0,33	0,75	0,06	1,97	7847
Black Volta – Boromo	37140	176	0,47	0,04	0,72	0,04	1,98	14603
Comoe – Diarabakoko	2350	135	0,59	0,56	0,48	0,11	1,84	633
Black Volta – Boromo	37140	29	0,47	0,04	0,72	0,04	1,98	14603
Dargol – Tera	2750	31	0,58	0,14	0,08	0,06	1,79	82
Maradi – Madarounfa	5400	41	0,63	1,10	0,33	0,01	1,98	606
Dargol – Kakassi	6940	37	0,54	0,25	0,18	0,06	1,80	395
Garouol – Dolbel	7500	31	0,53	1,21	0,05	0,05	1,69	640
Sirba – Garbe-Kourou	38750	20	0,63	-0,14	0,21	0,03	1,90	15305
Gorouol – Alcongou	44900	6	0,69	2,33	0,33	0,01	1,97	5215
Tsanaga – Bogo	1535	188	0,66	2,48	0,43	0,23	1,61	324
Bini – Berem	1585	513	0,13	-0,47	0,31	0,33	1,22	75

* В таблице использованы следующие обозначения: F – площадь водосбора; h – слой стока; C_V – коэффициент вариации; C_S – коэффициент асимметрии; $r(1)$ – коэффициент автокорреляции.

По представленным в таблице данным с использованием стандартных ГИС-технологий (*ArcView*, *Surfer*) построены карты распределения всех рассматриваемых характеристик. На рис. 2 представлена карта распределения критерия устойчивости β и интенсивности климатического шума.

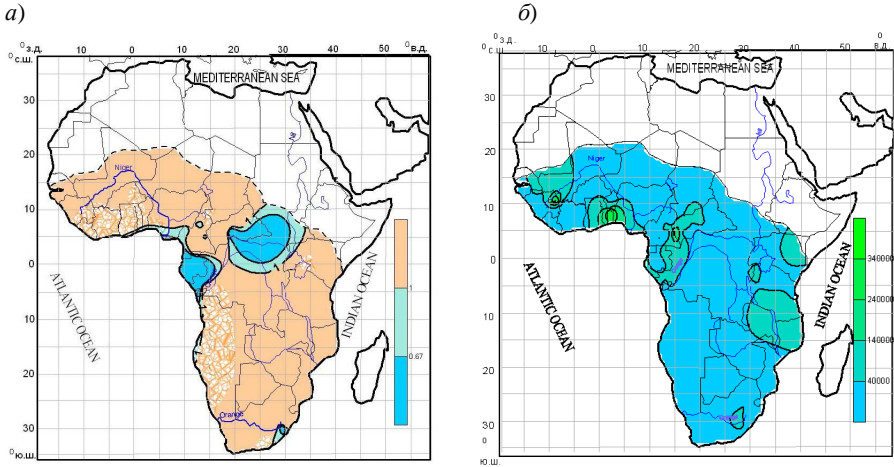


Рис. 2. Распределение критерия устойчивости β (а) и интенсивности климатического шума (б).

Из этих карт видно, что изолинии параметров β и $G_{\tilde{N}}$ никак не коррелируют друг с другом. Это объясняется тем, что параметр устойчивости $\beta = G_{\tilde{c}} / \bar{c}$ – внутренняя характеристика речного бассейна; именно внутренние свойства систем определяют степень их устойчивости. Климатический шум влияет самым непосредственным образом на дисперсию стоковых характеристик, но не определяет их устойчивость.

В четвертой главе выполнена сценарная оценка расчетных гидрологических характеристик по четырем климатическим сценариям, включая оценку степени их устойчивости к прогнозному значению критерия β . Для каждого прогнозируемого сценария проведено сравнение прогнозных карт с фактическими и выделены зоны, в которых имеются статистически значимые отклонения. На рис. 3 приведены подобные примеры для сценария Commit.

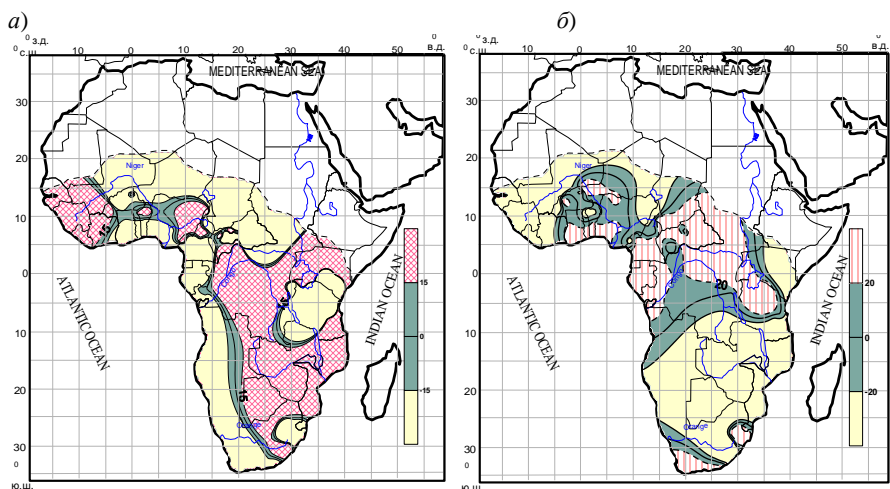


Рис. 3. Статистически значимые различия прогнозных и фактических норм (а) и коэффициентов вариации (б).

В диссертации проведена качественная оценка возможных экономических последствий появившихся аномалий для стран Юго-Западной Африки. Они сводятся, в основном, к возможной нехватке водных ресурсов и их значительных межгодовых колебаниям.

Также в работе выполнена количественная оценка реакции критериев оптимальной плотности режимной гидрологической сети к возможным климатическим колебаниям в тех регионах, где ожидаются существенные изменения стоковых характеристик, входящих в критерии оптимальности (градиенты норм стока и коэффициенты вариации). Сравнение необходимого оптимального числа постов с оптимальным числом, соответствующим текущему климату, указывает, что возможное потепление позволит разрядить сеть постов примерно на 10–30 %, Особенно это касается ЮАР, в которой в настоящее время реальная сеть существенно плотнее, чем требуется по критериям.

В заклучении сформулированы основные результаты исследований.

1. Из имеющихся 144 фактических рядов наблюдений за гидрологическим режимом Юго-Западной Африки сформирована информационная база, состоящая из 114 рядов, позволяющая применить технологии оценки стоковых характеристик как существующего гидрологиче-

ского режима, так и возможной его сценарной оценки для существующих климатических сценариев.

2. Статистические расчеты сформированных рядов наблюдений позволили дополнить существующую базу знаний многолетнего годового речного стока, представленную в Мировом атласе нормой и коэффициентом стока, набором карт распределения коэффициентов вариации, асимметрии и автокорреляции, а также критерия устойчивости моментов и интенсивности климатического шума.

3. Выполнены долгосрочные сценарные оценки всех параметров, перечисленных в п. 2, за исключением интенсивности климатического шума, который при существующем уровне знаний гидрометеорологии приходится экстраполировать для новых условий, оставляя неизменным. Для его «оживления» необходимо провести самостоятельные исследования, связывая его с параметрами, уже присутствующими в климатических сценариях.

4. Выявлены регионы статистически значимых отклонений прогнозных характеристик стока от фактических и показаны на качественном и, частично, количественном уровне возможные последствия изменения многолетнего стока для экономики и самой гидрометеорологии в отношении плотности гидрологической режимной сети.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Факторы, влияющие на многолетнюю изменчивость составляющих мирового водного баланса // Вестник Астраханского государственного технического университета, естественные и технические науки, № 1, 2011. – С. 13–16 (в соавторстве с Бухарициным П. И.).

2. Водообеспеченность Африканского континента // Труды Международной научной конференции «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность», Институт водных проблем РАН (ИВП РАН), кафедра ЮНЕСКО «Управление водными ресурсами и экогидрология», 2011. – С. 74–76. (в соавторстве с Бухарициным П. И.).

3. Водохозяйственные проблемы центральной Африки в условиях неопределенности климатических изменений и антропогенных воздействий // Вестник Астраханского государственного технического университета, естественные и технические науки, № 1, 2012. – С. 37–40 (в соавторстве с Бухарициным П. И.).

4. Оценка долгосрочных изменений вероятностных характеристик максимального стока // Сборник материалов XVI Всероссийской научно-практической конференции «Стратегия устойчивого развития регионов России», Новосибирск, 2013. – С. 124–126 (в соавторстве с

Гайдуковой Е. В., Хаустовым В. А., Дехтяревым А. А., Головановой Е. Ю.).

5. Оценка гидрологических характеристик годового стока рек Юго-Западной Африки // Технические науки – от теории к практике, № 28, 2013. – С. 141–151 (в соавторстве с Гайдуковой Е. В.).

6. Применение зависимости фрактальных размерностей рядов испарения от норм температуры приземного воздуха для устойчивого описания процесса формирования речного стока // Universum: технические науки, № 1(2), 2014. – С. 6–12 (в соавторстве с Гайдуковой Е. В.).

7. Оптимизация режимной гидрологической сети в Юго-западной Африке // Труды Международной научно-практической конференции «Технические науки: тенденции, перспективы и технологии развития», 2014. – С. 69–72 (в соавторстве с Гайдуковой Е. В.).

8. Assessment of changes in characteristics of runoff of Africa for various climate scenarios // International Conference on Engineering Technology, Engineering Education and Engineering Management (ETEEEM 2014), с. 21–23 (в соавторстве Viktor V. Kovalenko, Ekaterina V. Gaidukova, H. Diawara, Ernesto S. Bongu).

В рецензируемых источниках по списку ВАК:

9. Оценка современного состояния водных ресурсов континентальных регионов земного шара // Геология, география и глобальная энергия, № 1, 2011. – С. 121–132 (в соавторстве с Бухарициным П. И.).

10. Гидрологические характеристики многолетнего годового стока Юго-Западной Африки // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, № 28, 2013. – С. 30–40.

11. Устойчивость формирования вероятностного режима многолетнего речного стока в Арктическом регионе России // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, № 36, 2014. – С. 7–12 (в соавторстве с Коваленко В. В., Гайдуковой Е. В.).