

Министерство образования и науки РФ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
(РГГМУ)

На правах рукописи
УДК [556.162 "451":551/583](682.4)

Хамлили Абделатиф

**УСТОЙЧИВОСТЬ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕГО
ГОДОВОГО СТОКА СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ АФРИКИ И ДОЛГОСРОЧ-
НАЯ ОЦЕНКА ЕГО СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ КЛИ-
МАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ**

Специальность 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2011

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете

Научные руководители: доктор технических наук,
профессор Коваленко Виктор Васильевич,
доктор физико-математических наук
Кондратьев Сергей Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор географических наук,
профессор Догановский Аркадий Михайлович
кандидат технических наук,
Соловьев Филипп Леонидович

Ведущая организация: Центр Междисциплинарных исследований
по проблемам окружающей среды РАН

Защита диссертации состоится «24» ноября 2011 г. в 15³⁰ часов на заседании специализированного совета Д212.197.02 Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета

Автореферат разослан «24» октября 2011 г.

Ученый секретарь специализированного совета,
кандидат географических наук

Воробьев В. Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время практически все гидрометеорологи вынуждены согласиться с инструментально фиксируемым фактом потепления климата (споры ведутся только о его причинах). В связи с этим возникает проблема, связанная с оценкой экономических и экологических последствий такого потепления. Эту проблему невозможно решить без знания долгосрочных оценок вероятностных характеристик многолетнего речного стока, в первую очередь – годового, являющегося индикатором обеспеченности водными ресурсами регионов интенсивного водопотребления. Методологии подобных оценок разработаны и успешно применяются для различных видов речного стока России. Однако попытка их применения для Африки успехом не увенчалась. Выяснилось, например, что решения системы уравнений для моментов, используемых в классе распределений К. Пирсона, неустойчивы (для России решения подобных моделей для годового стока неустойчивы в южных регионах). Позже выяснилось, что эта неустойчивость связана, в основном, с очень малыми коэффициентами стока. Была предпринята попытка расширения размерности моделей (фрактальная диагностика, сделанная для рядов годового стока доктором Куасси Би Гессан Арманом из Кот-Д'Ивуара в 2008 г.), но сами модели в силу ряда трудностей для Африки не получены до сих пор.

Однако в РГГМУ два года назад были найдены еще две возможности обеспечения устойчивости прогностических моделей: 1) переход к условным распределениям (диссертация защищена Л. Ф. Соловьевым в 2009 г.) и 2) переброс мультипликативных шумов (вызывающих неустойчивость) в аддитивное внешнее воздействие. Тем самым были созданы предпосылки для возможности устойчивого прогнозирования долгосрочных изменений годового стока Африки. Таким образом на текущий момент тема диссертации актуализирована не только очевидной «социальной потребностью», но и реальной возможностью эту потребность удовлетворить.

Цели и задачи исследования. Целью исследования является разработка методики устойчивого оценивания характеристик многолетнего стока и ее применение для получения вероятностных параметров годового стока Северо-Западной Африки.

Для достижения сформулированной цели решены следующие задачи:

– созданы базы данных по годовому стоку, осадкам и приземной температуре воздуха по 149 пунктам наблюдений на территории Северо-Западной Африки;

– с использованием стандартной гидрометеорологической информации и ГИС-технологий рассчитаны и закартированы статистические характеристики многолетнего годового стока Северо-Западной Африки;

– вычислены и закартированы критерии устойчивости решений стохастических моделей (для моментов) формирования годового стока в двух вариантах: с мультипликативными и аддитивными шумами;

– выполнена параметризация двух вариантов прогностических моделей на изучаемой территории общей площадью более 5 млн. км²;

– для климатических сценариев COMMIT, SRA1B, SRA2 и SRB1 получены и закартированы оценки расчетных гидрологических характеристик на 2040–2060 гг.;

– выявлены и закартированы зоны статистически значимых отклонений (аномалий) прогностических характеристик от фактических;

– оценена устойчивость прогностических режимов формирования вероятностного режима многолетнего годового стока полученных по моделям с аддитивными и мультипликативными шумами.

Методика исследований и исходный материал. Решение поставленных задач основывалось на методологии частично инфинитного моделирования, разработанной в РГГМУ. В основе примененных методов прогнозирования и оценки устойчивости вероятностных распределений стока (начальных моментов) лежала модель линейного формирующего фильтра, прошедшая широкую апробацию на речных бассейнах России, Колумбии, Боливии, Камеруна, Китая, Никарагуа, Кот-Д'Ивуара.

Фрактальные размерности оценивались на основе теоремы Такенса с помощью корреляционного интеграла (информационной размерности).

Реализация методик осуществлялась 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, а также карты Мирового водного баланса.

Научная обоснованность и достоверность результатов работы основывается на использовании в качестве модели формирования го-

дового стока широко апробированного в гидрологии за последние 20 лет уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК), приводящего в условиях стационарного случайного процесса к семейству кривых К. Пирсона, широко применяемых в инженерных расчетах. Также использовались широко известные статистические оценки надежности промежуточных результатов и линейная теория устойчивости решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

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

1. По итогам статистической обработки гидрометеорологических рядов для Северо-Западной Африки построены карты распределения нормы, коэффициентов вариации и асимметрии, а также коэффициентов автокорреляции.

2. Рассчитаны и закартированы численные значения критерия устойчивости статистических моментов моделей формирования годового стока с мультипликативными и аддитивными шумами для Северо-Западной Африки (впервые).

3. Впервые для Африки оценены долгосрочные последствия климатических изменений для многолетнего годового стока по двум вариантам стохастической модели его формирования (с аддитивными и мультипликативными шумами) и выявлены регионы, в которых ожидаются наиболее существенные отклонения прогнозных значений расчетных характеристик от текущих.

4. Впервые на примере годового стока Африки оценена устойчивость ожидаемых режимов формирования многолетнего стока.

5. Впервые (для Северной Африки) оценена фрактальная размерность рядов годового стока и диагностированы размерности пространств вложения.

6. Для территории Алжира выполнена оценка долгосрочных изменений статистических характеристик малых рек по различным климатическим сценариям.

Практическая значимость исследований заключается в возможности использования полученных методик и карт проектными и научно-исследовательскими организациями для повышения надежности проектируемых сооружений.

Работа выполнялась в рамках темы «Создание диагностических и прогностических моделей развития процессов катастрофического формирования многолетнего речного стока», финансируемой Мини-

стерством образования и науки РФ (грант, проект № 2.1.1/3355). Ее результаты внедрены в учебный процесс по специальности «Гидрология» – 07.32.00 в РГГМУ и переданы в гидрометеорологическое агентство республики Алжир.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Способ оценки устойчивости моментов стохастической модели формирования многолетнего годового стока с аддитивными шумами и его применение для условий Африки, позволившие выбрать надежный вариант оценки долгосрочных последствий изменения климата на расчетные гидрологические характеристики.

2. Методика оценки долгосрочных изменений вероятностных характеристик годового стока, вызванных колебаниями климата, обеспечивающая устойчивость прогнозируемого режима в рамках распределений К. Пирсона при условии аддитивного задания потерь стока на испарение.

3. Гидрологические карты распределения по территории Северо-Западной Африки расчетных характеристик многолетнего годового стока на середину XXI в. при условии реализации наиболее вероятного климатического сценария СОММ1Т, реализующего модель HADCM3 для условий среднего экономического роста стран Африки.

Апробация работы. В 2009–2011 основные положения диссертации докладывались на Межрегиональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Вопросы гидрологии, геоэкологии и охраны водных объектов» (Пермский государственный университет), на Межвузовской научно-практической конференции студентов и аспирантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» (Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций), на итоговой сессии Ученого совета РГГМУ и на научных семинарах кафедры гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ.

По теме диссертации опубликовано 6 статей (4 в изданиях по списку ВАК).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, содержащего 46 источников, 7 приложений. Работа изложена на 157 страницах текста, включая 30 рисунков, 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы.

В первой главе рассматривается изученность многолетнего гидрологического режима Северной и Западной Африки, а также состояние гидрологической науки в отношении надежности оценок характеристик годового стока в условиях изменяющегося климата.

В настоящее время многолетний режим речного стока в Африке оценивается, в основном, с использованием карт Мирового водного баланса. Представленные в Атласе карты нормы годового стока отражают статистически стационарные гидрологические ряды, а также – устойчивость моментов в рамках семейства распределений К. Пирсона. Оба эти предположения в настоящее время могут быть поставлены под сомнение.

В последнее десятилетие в гидрологию были широко внедрены стохастические модели формирования стока, которые позволяют выявлять критерии устойчивости их решений по начальным моментам. Оказалось, что почти половина территории СНГ и Западной Африки неустойчива по второму и третьему начальным моментам, что ставит под сомнение возможность надежных долгосрочных оценок изменения характеристик стока при изменении климата.

В связи с этим логически возникает проблема разработки методологии, повышающей устойчивость решения моделей формирования речного стока. Подобная методология разработана в РГГМУ в рамках идей частично инфинитного моделирования. Она предлагает, по крайней мер, две альтернативные возможности, повышающих указанную устойчивость: 1) усложнение моделей путем увеличения размерности фазового пространства, в которое «погружаются задачи»; 2) упрощение моделей путем их разгрузки от мультипликативных шумов из-за которых и возникает неустойчивость. В данной диссертации использована вторая возможность. Исходя из этого, в конце главы формулируется цель и ставятся задачи исследований.

Во второй главе создается информационная база для параметризации прогностических вариантов моделей формирования многолетнего стока и оценки устойчивости их решений. Такой базой служат карты статистических характеристик годового стока, соответствующие стационарному климатическому режиму (норма, коэффициенты: вариации, асимметрии, стока, автокорреляции; а также критерии устойчивости).

Для построения этих карт использовался 51 ряд многолетнего годового стока для речных бассейнов, расположенных в 16 государствах рассматриваемой части Африки. Ряды наблюдений охватывали период с 1964 по 2004 гг. При их статистической обработке использовались все рекомендации инженерной гидрологии (построение разностно-интегральных кривых, оценка погрешностей и т. д.).

Результаты расчетов были закартированы с использованием современных ГИС-технологий (коммерческих программ *ArcView*, *Surfer*, *MapInfo*).

На основе полученных карт была оценена устойчивость закартированных моментов (расчетных гидрологических характеристик) по критериям линейной теории устойчивости (см. стр. 12) для двух вариантов моделей стока: с мультипликативными и аддитивными шумами. Обе карты представлены на рис. 1.

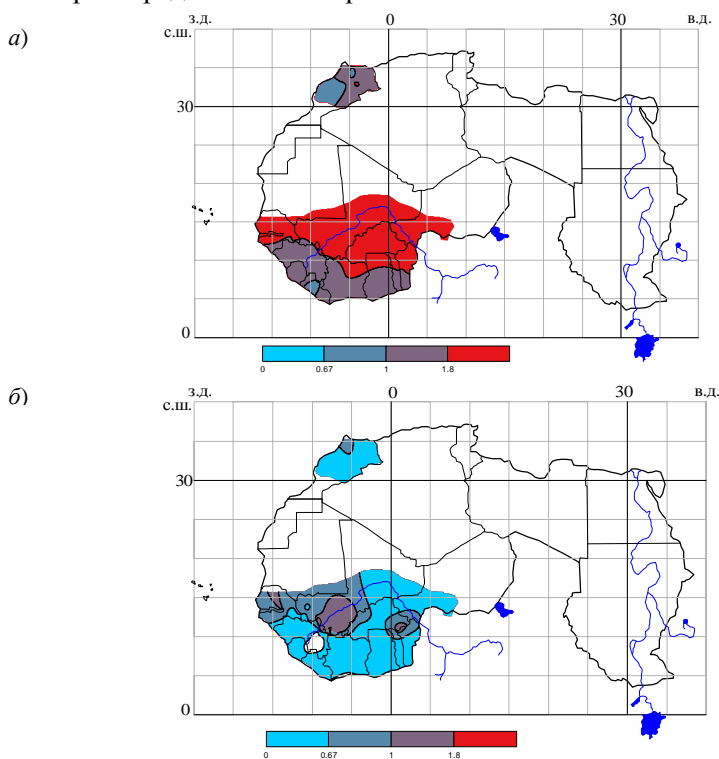


Рис. 1. Распределения критерия устойчивости β для мультипликативной (а) и аддитивной (б) моделей.

Как видно из представленных карт, на территории Северо-Западной Африки имеются районы как с устойчивым режимом формирования стока, так и неустойчивым (в основном в пустынных районах с преобладающим влиянием испарения в многолетних водных балансах речных бассейнов).

Характерной особенностью является то, что использование модели с аддитивными шумами дает более устойчивую картину, что особенно наглядно показывает таблица 1.

Таблица 1

Критерии устойчивости для моделей с мультипликативными (β_1) и аддитивными (β_2) шумами

| Страна | Река | Станция | $r(1)$ | X , мм | q , л/с км ² | k | b_1 | b_2^* |
|-----------------------|-------------|--------------|--------|----------|---------------------------|------|-------|---------|
| Бенин | Mekrou | Barou | 0.60 | 930 | 2.52 | 0.09 | 1.91 | 0.97 |
| | Mono | Athieme | 0.22 | 1204 | 3.89 | 0.10 | 1.69 | -1.03 |
| | Oueme | Sagon | 0.38 | 1171 | 3.13 | 0.08 | 1.84 | 0.07 |
| | Oueme | Bonou | 0.43 | 1130 | 2.96 | 0.08 | 1.86 | 0.30 |
| | Mou Houn | Dapola | 0.56 | 899 | 2.22 | 0.08 | 1.91 | 0.86 |
| Буркина-Фасо | Nakanbe | Yakala | -0.19 | 710 | 0.67 | 0.03 | - | - |
| | Sanaga | Edea | 0.32 | 1669 | 14.0 | 0.26 | 1.40 | -0.26 |
| Продолжение таблицы 1 | Pra | Daboasi | 0.30 | 1339 | 7.95 | 0.19 | 1.56 | -0.38 |
| | Tano | Alanda | -0.14 | 1389 | 8.80 | 0.20 | - | - |
| Гана | Black Volta | Bamboi | 0.28 | 1051 | 1.44 | 0.04 | 1.89 | -0.53 |
| | White Volta | Yarugu | -0.01 | 750 | 1.50 | 0.06 | - | - |
| | Oti | Sabari | 0.63 | 1031 | 4.89 | 0.15 | 1.86 | 1.08 |
| Гвинея | Niger | Kouroussa | 0.23 | 1802 | 12.6 | 0.22 | 1.36 | -0.91 |
| | Tinkisso | Ouaran | -0.09 | 1430 | 7.28 | 0.16 | - | - |
| | Milo | Kankan | -0.13 | 1845 | 19.1 | 0.33 | - | - |
| Либерия | Saint John | Baila | 0.02 | 2211 | 9.04 | 0.13 | 0.95 | -6.13 |
| Мали | Senegal | kayes | 0.55 | 822 | 2.54 | 0.10 | 1.88 | 0.81 |
| | Senegal | Galougo | 0.60 | 1067 | 3.33 | 0.10 | 1.90 | 0.97 |
| | Faleme | Gourbassi | 0.41 | 1270 | 7.10 | 0.18 | 1.69 | 0.23 |
| | Faleme | Fadougou | 0.55 | 1276 | 7.93 | 0.20 | 1.77 | 0.80 |
| | Bafing | Dibia | 0.53 | 1239 | 9.41 | 0.24 | 1.70 | 0.73 |
| | Bakoya | Oualia | 0.58 | 914 | 1.29 | 0.04 | 1.95 | 0.90 |
| | Baoule | Dioila | 0.74 | 1214 | 3.60 | 0.09 | 1.94 | 1.39 |
| | Sankarani | Gouala | 0.33 | 1569 | 9.08 | 0.18 | 1.60 | -0.19 |
| | Bani | Douana | 0.79 | 1137 | 3.26 | 0.09 | 1.96 | 1.52 |
| | Niger | Kirango Aval | 0.74 | 1393 | 8.25 | 0.19 | 1.89 | 1.40 |

Продолжение таблицы 1

| Страна | Река | Станция | $r(1)$ | X , мм | q , л/с км ² | k | b_1 | b_2^* |
|-------------|------------------|----------------|--------|-------------|------------------------------|------|-------|---------|
| Нигер | Niger | Koulikoro | 0.37 | 1456 | 10.6 | 0.23 | 1.54 | 0.00 |
| | Goulbi de Maradi | Madarounfa | -0.28 | 731 | 0.96 | 0.04 | – | – |
| | Gorououl | Alcongou | 0.04 | 441 | 0.19 | 0.01 | 1.91 | -4.32 |
| | Gambie | Kedougou | 0.40 | 1337 | 11.6 | 0.27 | 1.50 | 0.15 |
| | Casamance | kolga | 0.58 | 1209 | 0.80 | 0.02 | 1.98 | 0.90 |
| Сенегал | Gambie | Wassadou aval | 0.42 | 1128 | 4.19 | 0.12 | 1.80 | 0.26 |
| | Niokolo-Koba | Pont Routier | 0.44 | 1293 | 3.01 | 0.07 | 1.88 | 0.37 |
| | Thiokoye | Pont Routier | 0.36 | 1270 | 10.5 | 0.26 | 1.46 | -0.07 |
| | Gambie | Gouloumbou | 0.41 | 1168 | 4.42 | 0.12 | 1.79 | 0.24 |
| | Niaoula | Niaoula Tanou | 0.61 | 1024 | 0.27 | 0.01 | 1.99 | 1.01 |
| | Diarha | Pont Routier | 0.50 | 1333 | 10.9 | 0.26 | 1.65 | 0.62 |
| | Faleme | Kidira | 0.60 | 1027 | 4.17 | 0.13 | 1.87 | 0.99 |
| | Gambie | Wassadou amont | 0.42 | 1246 | 6.72 | 0.17 | 1.71 | 0.27 |
| | Gambie | Simenti | 0.49 | 1293 | 6.58 | 0.16 | 1.77 | 0.56 |
| | Gambie | Mako | 0.41 | 1299 | 9.09 | 0.22 | 1.61 | 0.22 |
| | Senegal | Bakel | 0.49 | 876 | 2.42 | 0.09 | 1.88 | 0.57 |
| Того | Mono | Correkope | 0.44 | 1257 | 4.52 | 0.11 | 1.81 | 0.35 |
| | Oti | Mango | 0.64 | 954 | 2.84 | 0.09 | 1.92 | 1.12 |
| Кот-Д'Ивуар | Bandama | Tiassale | 0.32 | 1205 | 2.17 | 0.06 | 1.87 | -0.29 |
| | Ouergha | Ourtzagh | 0.51 | – | 12.6 | – | – | 0.66 |
| | Sebou | Azib Soltane | 0.59 | 550 | 3.10 | 0.18 | 1.81 | 0.94 |
| Марокко | Moulouya | Dar el Caid | 0.44 | 375 | 0.78 | 0.07 | 1.89 | 0.36 |
| | Oum er Rebia | Dechra el Oued | 0.36 | 448 | 8.99 | 0.63 | 0.72 | -0.03 |
| | Ouergha | M'Jara | 0.49 | 471 | 14.0 | 0.94 | 0.67 | 0.58 |
| | Sebou | Ain Timedrine | 0.40 | 479 | 4.23 | 0.28 | 1.49 | 0.16 |

* – отрицательные значения β_2 идентифицируют устойчивость четырех начальных моментов

В третьей главе выполнена оценка долговременных изменений вероятностных характеристик стока на 2060 г. по климатическим сценариям COMMIT, SRA1B, SRA2, SRB1 модели HADCM3, рекомендуемой к применению при водноресурсных прогнозах. Проведено выделение аномальных зон (в которых прогнозные значения гидрологических характеристик статистически значимо отличаются от фактических значений, полученных во второй главе). Также оценена степень устойчивости прогнозного режима формирования стока, полученного по вариантам модели с аддитивными и мультипликативными шумами.

Основой получения прогнозных характеристик и вычисления критерия устойчивости является уравнение ФПК, описывающее эво-

люцию марковских случайных процессов. Стохастической основой этой модели является дифференциальное уравнение, связывающее внешнее воздействие на водосбор с его реакцией и параметрами последнего:

$$dQ = (-(\bar{c} + \tilde{c})Q + \bar{N} + \tilde{N})dt, \quad (1)$$

где $c = 1/k\tau = \bar{c} + \tilde{c}$; $N = \mathcal{X}/\tau = \bar{N} + \tilde{N}$ [здесь \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 $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$; Q – расход воды в замыкающем створе; τ – время релаксации бассейна; k – коэффициент стока; \mathcal{X} – внешнее воздействие (интенсивность) осадков на водосбор].

Этот вариант модели мы называем мультипликативным, так как уравнение (1) содержит в качестве коэффициента при искомой функции Q задаваемые параметры, являющиеся источником внутренних шумов бассейна, определяющих устойчивость решения. Аналогичное по структуре уравнение будет, если эти шумы задать аддитивно: $c = 1/\tau$, $N = k\mathcal{X}/\tau$ (так как мы находимся в условиях простого марковского процесса, то для годового стока время релаксации τ определяется пересечением автокорреляционной функций доверительного интервала, а это, для подавляющего числа речных бассейнов, происходит при $\tau = 1$ году). Шум \tilde{c} в этом случае определяется не основным членом уравнения водного баланса – испарением, от которого зависят потери, – а изменением запасов воды в почво-грунтах, которые по мере увеличения интервала осреднения стремятся к нулю. Таким образом при аддитивном варианте модели мы в значительной мере ликвидируем источник неустойчивости решения, что и показывает приведенная выше таблица.

Уравнение (1) в любом из рассмотренных вариантов статистически эквивалентно уравнению ФПК, аппроксимируя которое системой уравнений для начальных моментов m_n , получим:

$$dm_n / dt = nM[AQ^{n-1}] + 0,5n(n-1)M[BQ^{n-1}], \quad (2)$$

где n – порядок момента; A, B – коэффициенты сноса и диффузии.

Уравнение (2) – это система из четырех обыкновенных дифференциальных уравнений, «развязанных» по моментам (младшие не зависят от старших). Критерий линейной устойчивости ее решений имеет вид:

$$\beta = G_{\bar{c}} / \bar{c} < 2 / n. \quad (3)$$

При $\beta > 0,67$ неустойчив третий момент, при $\beta > 1$ – второй. Практический путь нахождения численных значений параметра β заключается в использовании частного решения уравнения ФПК для нормированной автокорреляционной функции:

$$r = \exp[-(\bar{c} - 0,5G_{\bar{c}})\tau]. \quad (4)$$

При годовой сдвижке ($\tau = 1$) это уравнение приводит к выражению

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

определяемому по значениям k и r , которые находятся по стандартным гидрометеорологическим наблюдениям. В аддитивном случае, когда коэффициент k оказывается во внешнем воздействии, формула (5) принимает вид:

$$\beta = 2 \ln r + 2, \quad (6)$$

Весь представленный здесь аппарат использовался для долгосрочного прогнозирования и оценки устойчивости спрогнозированных режимов стока.

Так как все, существующие в открытом доступе, климатические сценарии даются в виде двадцатилетних квазиравновесных ступенек, то модель (2) можно свести к системе алгебраических уравнений. Сначала решается обратная задача: по известным из карт, полученных во второй главе, моментам m_n находятся параметры системы (2); а затем, меняя c и N в соответствии с используемым климатическим сценарием, решаем прямую задачу по определению прогнозных значений моментов. При этом для задания прогнозного значения k в аддитивной модели (или $c \sim 1/k$ в мультипликативной) использовалось выраже-

ние для коэффициента стока $k = \bar{Q} / \bar{X} = 1 - \bar{E} / \bar{X}$, получаемое из уравнения водного баланса для замкнутого водосбора. Коэффициент стока связывается с параметрами, которые фигурируют в климатических сценариях ($T^\circ \text{C}$ и \bar{X}), путем использования формулы Н. А. Багрова ($E = f(\bar{X}, E_0)$) (здесь E_0 – испаряемость) и Л. Тюрка ($E_0 = f(T)$)

$$k = 1 - \text{th}((300 + 25\bar{T} + 0,05\bar{T}^3) / \bar{X}) \quad (7)$$

(при использовании формулы связи $E = f(\bar{X}, E_0)$ Э. М. Ольдекопа численные результаты практически одинаковы).

На рис. 2, а и б представлены результаты наложения прогнозных карт коэффициентов вариации (вычисленных по двум вариантам модели) на фактические с выделенными статистически значимых отклонений ($> 15\%$), а на рис. 2, в и г – карты распределения зон неустойчивости. Из этих рисунков видно, что качественно обе модели дают похожие результаты, но модель с аддитивными шумами прогнозирует более устойчивый режим стока.

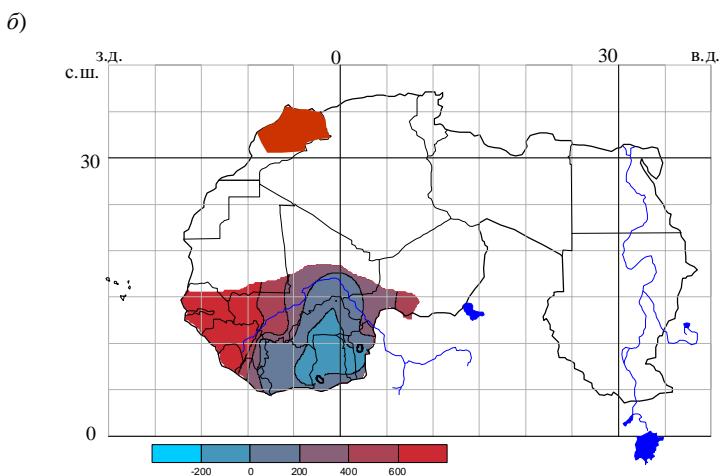
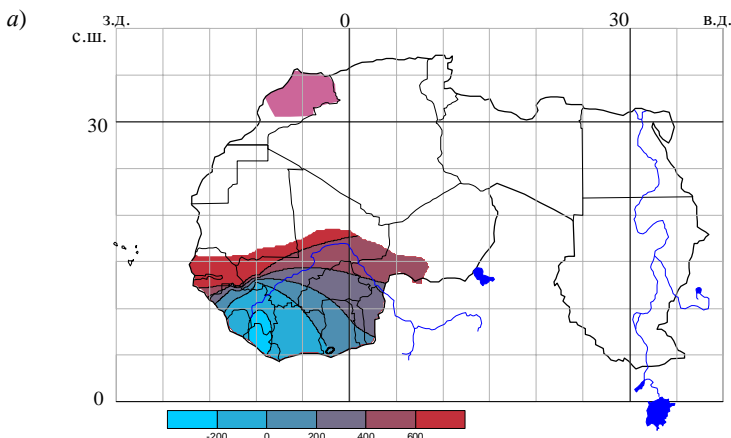
Для региона Северной Африки была выполнена фрактальная диагностика восьми рядов годового стока. Использовался метод, основанный на теореме Такенса. Вычислялась так называемая информационная размерность, позволившая определить как саму фрактальную размерность, так и размерность пространства вложения (табл. 2).

Таблица 2

Фрактальная размерность и размерность пространства вложения

| Страна | Река | Станция | Фрактальная размерность | Размерность пространства вложения |
|---------|--------------|----------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Марокко | Sebou | Azib Soltane | 1.15 | 2 |
| | Moulouya | Dar el Caid | 0.68 | 1 |
| | Oum er Rebia | Dechra el Oued | 0.61 | 1 |
| | Ouergha | M'Jara | 1.73 | 2 |
| | Sebou | Ain Timedrine | 1.47 | 2 |
| Алжир | Tafna | Pierre du Chat | 0.70 | 1 |
| | Cheliff | Sidi bel Attar | 1.67 | 2 |
| | Elkebir | El Ancert | 0.71 | 1 |

Эти данные не противоречат картам зон неустойчивости (рис. 2, в, г) – в этом регионе допустимо выполнять гидрологические расчеты и долгосрочное прогнозирование в рамках классических распределений семейства К. Пирсона. Что касается Западной Африки, то ее фрактальная диагностика была выполнена в 2008 г. доктором Куасси Би Гессан Арман (Кот-Д’Ивуар) и ее результаты также показали, что для Африки размерность пространства вложения меньше, чем для России, т. е. речной сток устойчиво описывается меньшим числом фазовых переменных.



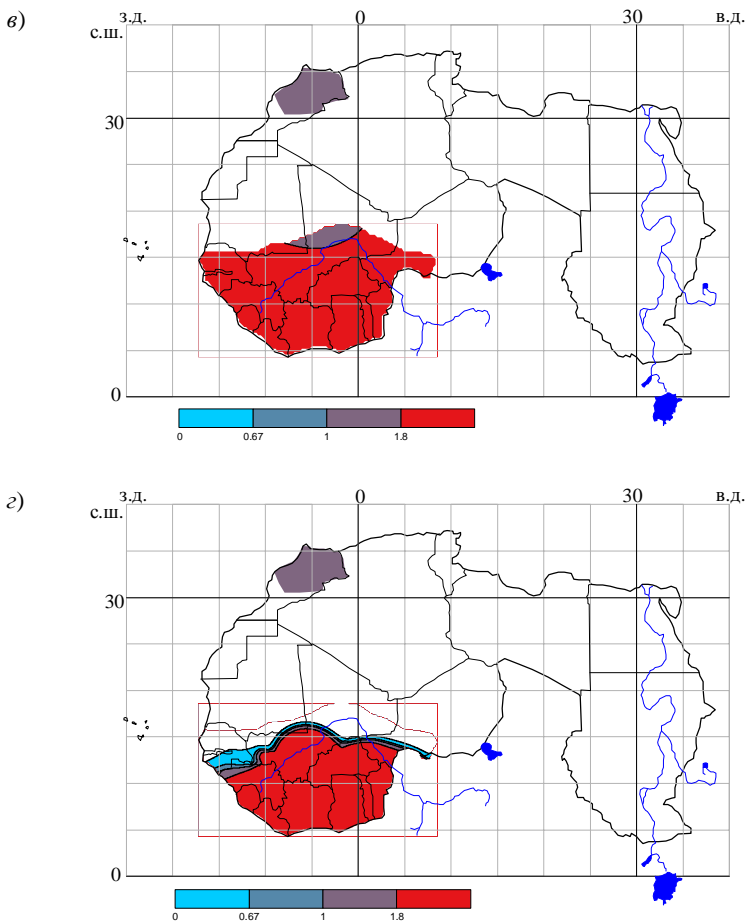


Рис. 2. Выявленные зоны аномалий коэффициентов вариации по мультипликативной (а) и аддитивной (б) моделям, а также соответствующие (в, г) прогнозные карты критерия устойчивости.

В четвертой главе рассмотрена возможность применения методики прогноза к азональным рекам Алжира. Используются данные о расходах воды по 26 станциям, расположенным на малых реках (площадь водосбора не превышает 1 500 км²). Рассчитаны критерии устойчивости по модели с мультипликативными и аддитивными шумами, дан прогноз на 2050 год по климатическим сценариям COMMIT, SRA1B, SRA2, SRB1. Получено, что многолетний модуль стока сред-

ний по рассматриваемой территории колеблется в диапазоне от 0,025 до 0,35 л/с км² в год по всем сценариям.

В заключениях сформулированы основные результаты исследований:

1. В результате обработки многолетних рядов гидрометеорологических элементов на территории Северо-Западной Африки удалось создать информационную базу в виде гидрологических карт для параметризации прогностических моделей формирования годового стока и осуществить оценку статистической устойчивости современного режима его формирования из которой следует, что с точки зрения устойчивости предпочтительно использовать модель с аддитивно задаваемыми внутренними шумами речных бассейнов.

2. Для Северо-Западной Африки успешно апробирована (на примере годового стока) методика долгосрочных оценок гидрологических последствий изменения климата по различным вариантам прогностических моделей и построены карты распределения статистических характеристик стока по наиболее востребованному климатическому сценарию на 2060 г.

3. Выявлены наиболее вероятные регионы, в которых можно ожидать статистически значимые изменения (по сравнению с существующим режимом стока) норм и коэффициентов вариации годового стока, определяющие водные ресурсы и возможные их колебания, что необходимо для стратегического планирования экономик развивающихся стран Африки.

4. Получены прогнозные оценки устойчивости статистических характеристик годового стока на 2060 г. и определены регионы, которые по обоим вариантам модели (с аддитивными и мультипликативными шумами) являются потенциально опасными с точки зрения применения классических моделей формирования стока.

5. Выполнена фрактальная диагностика стоковых рядов Алжира и Марокко, которая подтвердила как полученную прогнозную карту зон неустойчивости, так и сделанный ранее анализ фрактальных размерностей Западной Африки, из которого следует, что формирование многолетнего годового стока Африки происходит более просто, чем в России и для его моделирования требуется меньшее число фазовых переменных.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Устойчивость и фрактальная диагностика речного многолетнего стока России / Межрегиональная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Вопросы гидроло-

гии, геоэкологии и охраны водных объектов», Пермский государственный университет (в соавторстве с Гайдуковой Е.В., Лесничим Л. И., Девятовым В. С.).

2. Роль гидрологической прогнозной информации в организационно-технологическом подходе к построению хозяйственных систем // Межвузовская научно-практическая конференция студентов и аспирантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России», Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций (в соавторстве с Девятовым В. С., Лесничим Л. И., Гайдуковой Е.В.).

В рецензируемых источниках по списку ВАК:

3. Методика мониторинга и прогнозирования развития процессов катастрофического формирования многолетнего речного стока // «Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета», № 10, 2009, с. 5–12 (в соавторстве с Коваленко В. В., Гайдуковой Е. В., Чистяковым Д. В.).

4. Прогностические модели развития процессов катастрофического формирования многолетнего годового речного стока // Журнал «Метеорология и гидрология» № 10, 2010, с. 64–70 (в соавторстве с Коваленко В. В., Гайдуковой Е. В., Чистяковым Д. В.).

5. Диагностирование неустойчивости формирования и фрактальной размерности многолетних рядов летне-осенней межени Восточной Сибири методами частично инфинитной гидрологии // «Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета», № 13, 2010, с. 30–39 (в соавторстве с Коваленко В. В., Гайдуковой Е. В., Громовой М. Н., Девятовым В. С.).

6. Оценка долгосрочных изменений статистических характеристик многолетнего годового стока Северо-Западной Африки при климатических изменениях // «Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета», № 18, 2011. – С. 5–9.

Отпечатано с готового оригинал-макета

Лицензия ЛР № 0203090 от 30.12.96

Подписано в печать с оригинал-макета 21.10.2011

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