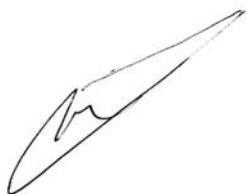


Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное учреждение высшего
профессионального образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
(РГГМУ)

УДК [556.16.06:51-7](470.2)

На правах рукописи



Куасси Куаме Модест

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Научный руководитель:
доктор техн. наук, профессор



В. В. Коваленко

Научный консультант:
кандидат техн. наук, доцент



Е. В. Гайдукова

Санкт-Петербург 2015

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Сокращения	4
Введение	5
1 Современное состояние многолетнего годового стока Западной и Южной Африки и постановка задач диссертации	10
1.1 Водные ресурсы Западной и Южной Африки	10
1.2 Климатические сценарии и возможные климатические изменения в Африке	21
1.3 Постановка задач диссертации	29
2 Методика оценки долгосрочных изменений годового стока	31
2.1 Математическая модель формирования стока и ее применение для долгосрочного прогнозирования	31
2.2 Устойчивость вероятностных характеристик многолетнего стока	35
3 Статистические характеристики речных бассейнов Юго-Западной Африки	38
3.1 Формирование базы данных по гидрологическим и метеорологическим величинам	40
3.2 Статистическая оценка гидрологических характеристик	54
3.3 Картирование гидрометеорологических характеристик	61
3.4 Сценарные метеорологические характеристики	69
4 Сценарная оценка вероятностных характеристик	78
4.1 Оценка нормы стока и коэффициента вариации	79
4.2 Прогноз критерия устойчивости β	84
4.3 Выявление аномальных зон	85
5 Оптимизация режимной гидрологической сети в Юго-Западной Африке	97
Заключение	117
Список использованных источников	118

Приложение А – Карты прогнозных статистических характеристик речного стока на период от 2040 по 2069 гг. по различным климатическим сценариям	124
Приложение Б – Карты распределения прогнозного критерия устойчивости на период от 2040 по 2069 гг. по различным климатическим сценариям	136
Приложение В – Корреляционная матрица для рядов рек Юго-Западной Африки	139
Приложение Г – Оптимальная площадь и оптимальное число постов	140
Приложение Д – Справки о внедрении	151

СОКРАЩЕНИЯ

- ГИС – геоинформационная система
- ЮАР – Южно-Африканская Республика
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
- ВМО – Всемирная Метеорологическая Организация

ВВЕДЕНИЕ

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 оказался более приемлемым (с точки зрения массовых инженерных расчетов) путь не усложнения модели формирования стока, а ее упрощение путем адаптации к относительно слабо изученному многолетнему режиму речного стока, да еще с неустойчивыми старшими моментами. 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 сеть (для Восточной Африки подобная задача не актуальна из-за отсутствия густой речной сети и пунктов измерения стоковых характеристик).

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 меняться 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, включая линейную теорию устойчивости.

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

– По итогам стандартных процедур, принятых в России (удлинение рядов, проверка наличия многоводных и маловодных фаз, установление факта однородности), сформировано 104 гидрологических ряда многолетнего годового стока, по которым построены карты распределения по исследуемой территории стандартных расчетных гидрологических характеристик, а также коэффициентов стока и автокорреляции при годовой сдвигке (карта для коэффициентов вариации, асимметрии и автокорреляции для Юго-Западной Африки построены впервые).

– 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.

– 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.

– 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 текущих.

– 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.

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

Практическая значимость исследований заключается в получении прогнозных 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 устойчивости 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-Аджане (республика Кот-Д'Ивуар, региональный отдел университетского исследования в г. Далон (URES-DALON)).

На защиту выносятся следующие положения:

– 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.

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

– 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).

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МНОГОЛЕТНЕГО ГОДОВОГО СТОКА ЗАПАДНОЙ И ЮЖНОЙ АФРИКИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДИССЕРТАЦИИ

1.1 Водные ресурсы Западной и Южной Африки

В Африке много важных и сложных водных проблем, которые в последнее время связывают с изменчивостью климата [1]. Кроме этого катастрофическую нехватку воды связывают с ростом численности населения и повышением уровня жизни. Четко выделены социальные аспекты проблемы нехватки воды: высокая стоимость коммунальных услуг по водоснабжению (особенно на урбанизированных водосборах), загрязнение рек и озер (на урбанизированных территориях достигающее уровня опасности для здоровья водных объектов), исторически сложившаяся конфликтная ситуация между странами по поводу распределения воды, недостаточность данных о водных ресурсах, низкое качество управления водными ресурсами, отставание уровня научных исследований в области гидрологии и водного хозяйства от мирового уровня [1].

Рассмотрим некоторые наиболее важные водные проблемы.

Проблема с канализацией. Африка – это континент с наименьшим обеспечением канализационными системами; есть страны, где канализация практически отсутствует. В среднем городское население обеспечено системами канализации на 84 %, в сельской местности – на 55 %. Существующие системы водоснабжения и канализации часто находятся в неудовлетворительном состоянии. Негативный эффект для водных объектов от плохой канализации даже больше, чем от ее отсутствия, поскольку почвенная очистка ведет к гораздо меньшему загрязнению вод, чем прямой сброс неочищенных стоков. Прямой сброс сточных вод промышленных предприятий вызывает и бактериальное, и химическое загрязнение рек, которое негативно сказывается

на здоровье населения и ведет к высокой заболеваемости. Одно из самых распространенных заболеваний – это диарея, с ней связаны заболевания, от которых в Африке ежегодно умирает 3 млн. человек, например, 72 % от всех случаев заболевания в мире холерой приходится на Африканский континент [2].

Следует отметить, что только в отдельных странах оросительные сбросные и промышленные сточные воды используются повторно, например, в Южноафриканской республике – 16 %, в Тунисе – 75 % сточных вод.

Проблема международных вод. Семнадцать водосборов Африканского континента с площадями более 100 тыс. км² относятся к международным водам, протекающим по территориям от 2 до 10 государств. Нескоординированное использование вод таких рек ведет к экологическим и экономическим ущербам, к социальным и политическим конфликтам. В среднем 75 % водных ресурсов Африки сосредоточены на водосборах восьми рек: Конго, Нигер, Огове, Замбези, Нил, Санага, Шари-Логоне и Вольта. При этом 50 % водных ресурсов принадлежит водосбору реки Конго. В бассейнах некоторых рек в настоящее время осуществляется кооперация по использованию и охране вод, например, между странами водосбора реки Нигер и рек бассейна озера Чад [3].

Физико-географическое описание водосборов рек Юго-Западной Африки

Рельеф

Африка, относительно, высокий материк: средняя высота 750 м над уровнем моря. Наибольшие высоты сосредоточены на востоке, где поднимаются Эфиопское нагорье, Восточно-Африканское плоскогорье и Драконовы горы. Здесь располагается высшая точка материка – вулканический массив Килиманджаро высотой 5895 м. Самое низкое место на материке – впадина Ассаль (–150 м) в Эфиопии, Каттара (–133 м) в Ливийской пустыне.

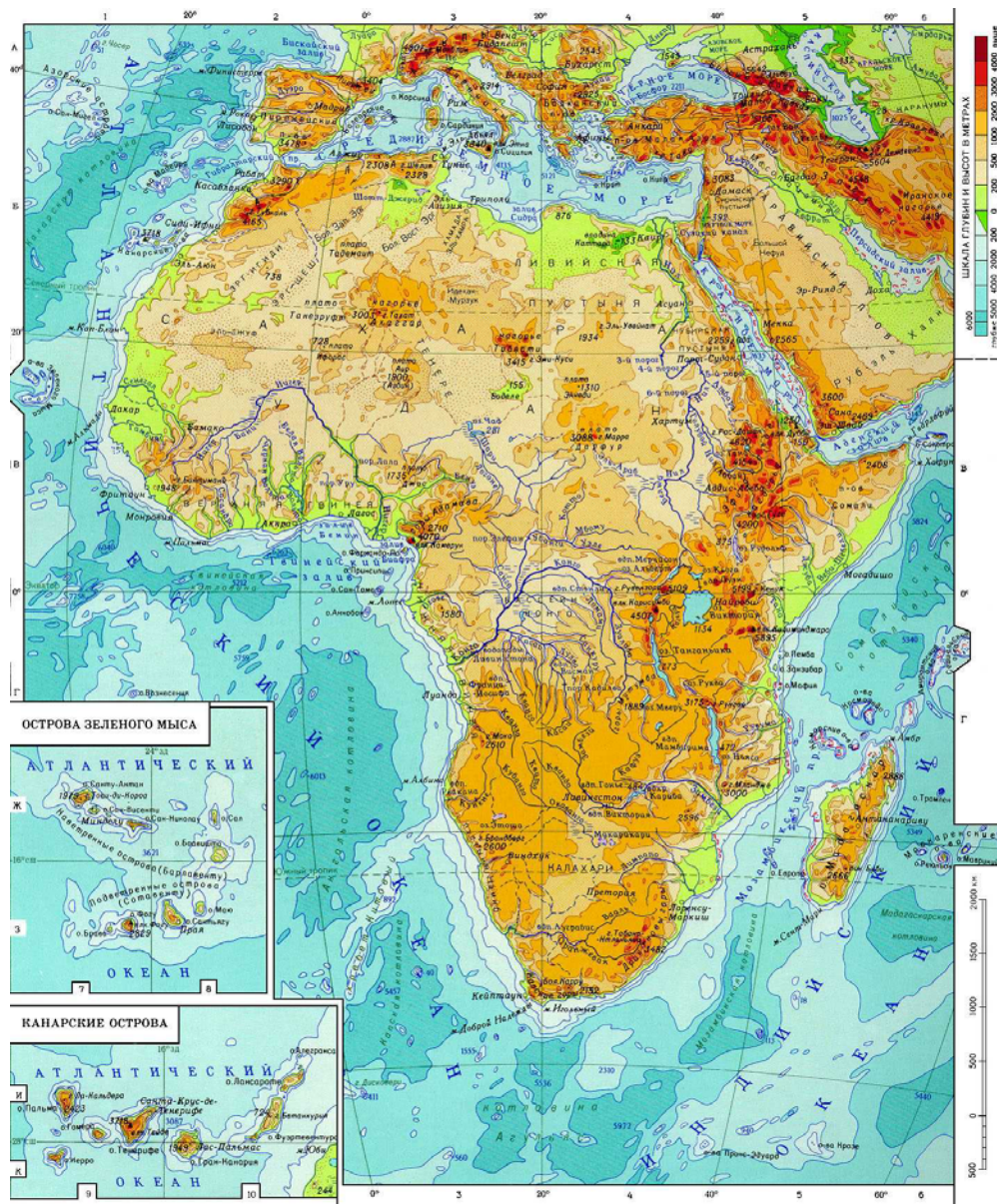


Рисунок 1.1 – Физико-географическая карта Африки [4].

По преобладающим высотам Африку подразделяют на два подконтинента: Низкая и Высокая Африка. Граница между ними проходит с юго-запада на северо-восток от города Бенгела (Ангола) до города Массауа (Эфиопия). Низкая Африка занимает почти 2/3 материка, охватывая его северную и западную части: здесь высоты преимущественно ниже 1000 м. Высокая Африка занимает южную и восточную части континента, где преобладают высоты более 1000 м (рисунок 1.1) [4]. Таким образом, в диссертации рассматривается часть Высокой Африки (южная) и часть Низкой Африки (западная).

Климат

Африканский континент почти полностью находится в области тропической (пассатной и экваториально-муссонной) циркуляции (рисунок 1.2).

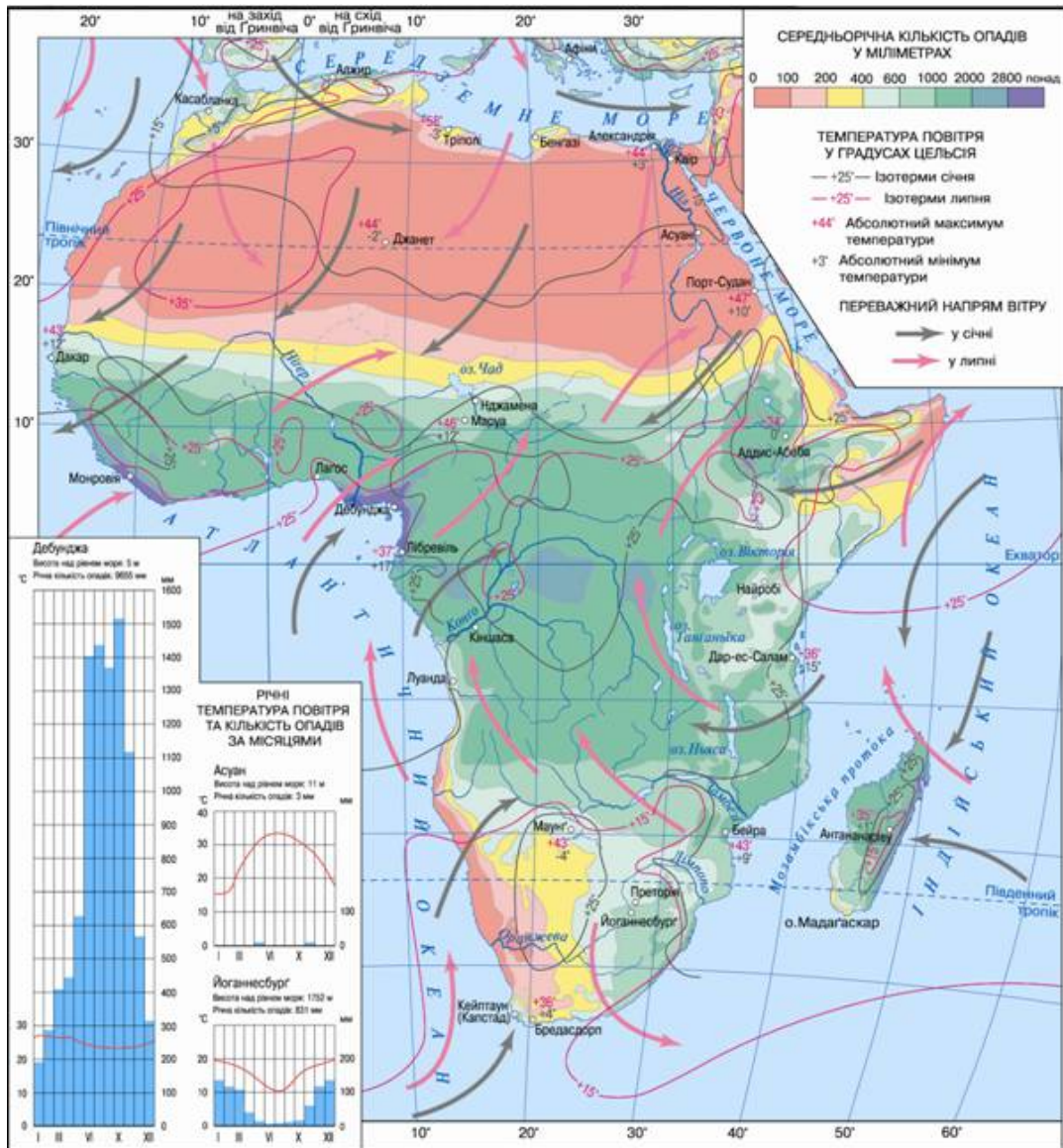


Рисунок 1.2 – Климатическая карта Африки [5].

Юго-запад и запад Южной Африки находятся под воздействием восточной периферии Южно-Атлантического антициклона, т. е. юго-восточных пассатов. В условиях низких температур холодного Бенгальского течения формируется ярко выраженная устойчивая стратификация воздушных масс, что препятствует конвекции и выпадению осадков в пустыне Намиб. Инверсионный слой располагается на высоте 550 м и до высоты 1230 м температура повышается в среднем на 7° [6].

В западной Африке Южные склоны Северо-Гвинейской возвышенности имеет экваториальный, постоянно влажный климат, в северной части – субэкваториальный климат с продолжительным дождливым и коротким сухим периодами. Температуры воздуха в течение всего года высокие. Средние температуры марта и апреля составляют от $+23$ до $+29^{\circ}\text{C}$, июля и августа от $+24$ до $+25^{\circ}\text{C}$ [7].

В центральной Африке температуры также высоки и равномерны в течение года. В приэкваториальной полосе среднемесячные температуры изменяются в пределах от $+23$ до $+25^{\circ}\text{C}$. Их колебания увеличиваются на крайних поднятиях: в Катанге температура самого теплого месяца $+24^{\circ}\text{C}$, самого холодного $+16^{\circ}\text{C}$ [7].

В Южной Африке Южно-Африканское плоскогорье – область сравнительно высоких температур, значительных суточных и годовых их колебаний. Но на плато температуры меньше колеблются из-за значительной высоты. Над большей частью плоскогорья летние температуры составляют от $+20$ до $+25^{\circ}\text{C}$, не поднимаясь выше $+40^{\circ}\text{C}$; зимние температуры изменяются от $+10$ до $+16^{\circ}\text{C}$ [7].

На рисунке 1.3 представлено распределение нормы приземной температуры воздуха по территории Юго-Западной Африки. Карта построена по данным Всемирной Метеорологической организации [8]. Видно, что для Западной Африки характерны более большие значения нормы температуры, чем для Южной Африки. Различие превышает десять градусов.

Главные различия в климате связаны не с температурными условиями, а с режимом осадков [7].

В Западной Африке на прибрежной низменности и наветренных склонах Северо-Гвинейской возвышенности годовое количество осадков составляет от 2000 до 3000 мм, а на наветренных склонах вулкана Камерун может превышать 10 000 мм. На побережье Ганы юго-западный ветер дует не под углом к берегу, а параллельно ему, в связи с этим годовая сумма осадков уменьшается до 700 мм [6].

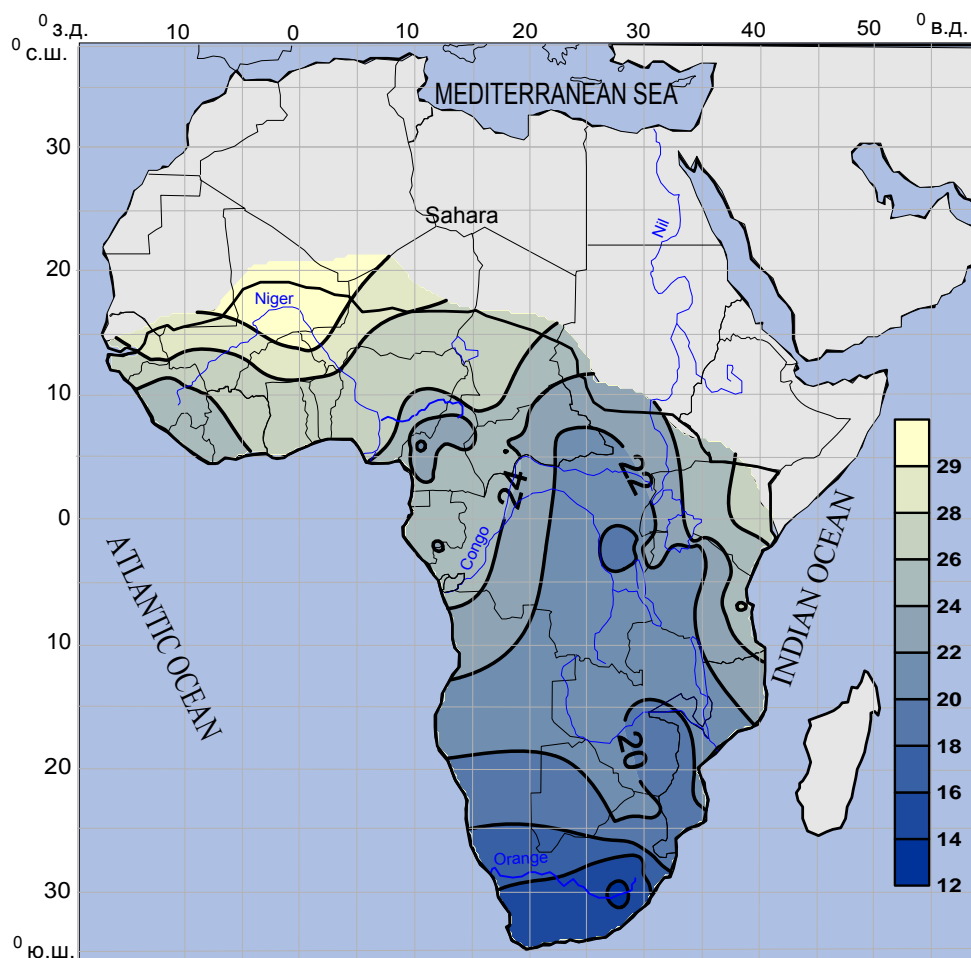


Рисунок 1.3 – Карта распределения нормы температуры воздуха по Юго-Западной Африке.

В центральной части Африки осадки выпадают равномерно за год, с максимумами весной и осенью; их количество в год достигает 2000 мм и более. При движении к северу и югу периоды дождей постепенно сливаются в один продолжительный период, который прерывается сравнительно коротким от 2 до 3 месяцев засушливым периодом с осадками ниже среднемесячной нормы. Наиболее влажные наветренные склоны Южно-Гвинейской возвышенности, здесь выпадает до 3000 мм осадков в год. Самой сухой является береговая низменность южнее устья реки Конго (примерно 500 мм в год и менее) [6].

Плоскогорье Южной Африки – область преимущественно малых количеств осадков, распределяющихся весьма неравномерно по его территории.

Их количество убывает с северо-востока на юго-запад. На севере области выпадает до 1500 мм влаги в год (сезон дождей, приносимых экваториальными муссонами, длится до 7 месяцев). Большое количество осадков выпадает на восточном побережье, где особенно ярко проявляется барьерная роль Великого Уступа (более 1000 мм в год, а на склонах нагорья Басуто – свыше 2000 мм). На восточных краевых плато количество осадков уменьшается: на плато Велд (от 750 до 500 мм) и Матабеле (от 750 до 1000 мм). Во внутренних районах летний максимум осадков сохраняется, но годовые суммы уменьшаются. На центральных равнинах Калахари сезон дождей сокращается до 5–6 месяцев, годовая сумма осадков не превышает 500 мм. К юго-западу количество осадков уменьшается до 125 мм в год. Самая засушливая часть области – береговая пустыня Намиб (менее 100 мм осадков в год). Мало осадков выпадает на западных краевых плато (до 300 мм в год) [7].

На рисунке 1.4 представлено распределение нормы осадков по территории Юго-Западной Африки. Карта построена по данным Всемирной Метеорологической организации [8]. Карта графически представляет выше приведенное описание режима осадков на рассматриваемой территории.

В таблице 1.1 показаны основные климатические характеристики различных частей Юго-Западной Африки. Из нее видно, что климат рассматриваемых частей Африки значительно отличается. Этому способствуют различия между разными климатообразующими факторами и интенсивностью их влияния на определенную территорию.

Гидрография Юго-Западной Африки

По объему водных ресурсов Африка значительно уступает Азии и Южной Америке. Гидрографическая сеть распределена крайне неравномерно, что видно на рисунке 1.5.

Река Сенегал находится в Западной Африке, протекает по Гвинейской Республике, Мали, Сенегалу, Мавритании. Берет начало в горном массиве Фута-Джаллон под названием Бафинг, после слияния с р. Бакой получает название Сенегал. Площадь бассейна 441 000 км², длина от истока р. Бафинг

1430 км. Река Сенегал впадает в Атлантический океан, образуя дельту площадью около 1500 км². Расход воды колеблется от 5 м³/с (в мае) до примерно от 2000 до 5000 м³/с (в августе – сентябре).

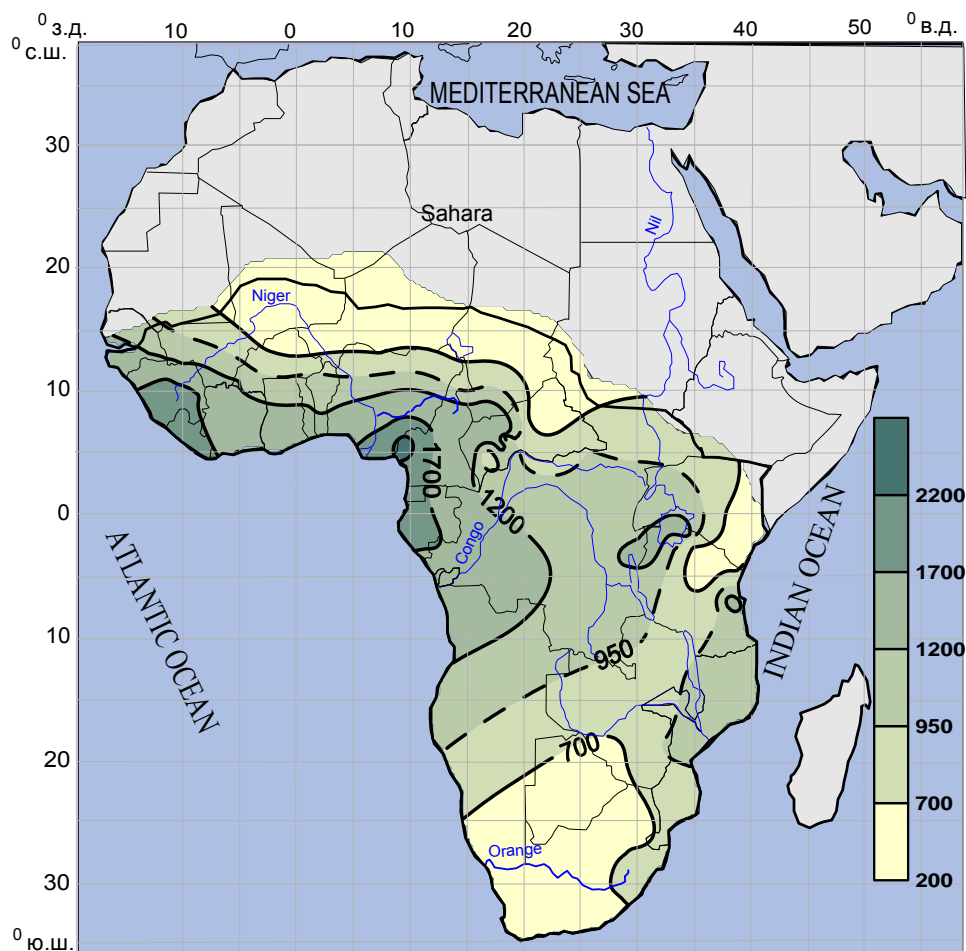


Рисунок 1.4 – Карта распределения нормы осадков по Юго-Западной Африке.

Таблица 1.1 – Климатические характеристики Африки [9]

Регион	Территория	Воздушные массы		Средняя температура, °С		Количество осадков, мм
		лето	зима	июль	январь	
Западная Африка	Атласские горы	троп.	умер.	+24 – +28	+5 – +8	от 200–300 до 800

Продолжение таблицы 1.1

Регион	Территория	Воздушные массы		Средняя температура, °С		Количество осадков, мм
		лето	зима	июль	январь	
	Судан	экват.	троп.	+25 – +30	+15 – +20	350–250 (север) 1500–2000 (юг)
	Северо-Гвинейская возвышенность	троп.	умер.	+24 – +25	+23 – +27	2000–3000
Центральная Африка	Впадина Конго	экват.	троп.	+23 – +25	+23 – +25	от 1500– 1700 до 2000
Южная Африка	Южно-Африканское плоскогорье	троп.	умер.	+20 – +25	+10 – +16	1500 (север) 500–1000 (восток) 125 (юго-запад)
	Капские горы	троп.	умер.	+12	+21	1800 (запад) 800 (восток)

В западной Африке течет также река Гамбия длиной 1200 км с площадью бассейна 180 000 км². Берет начало на плато Фута-Джаллон, впадает в Атлантический океан. Средний расход воды примерно равен 2000 м³/с.

Река Вольта – река в северо-западной части Африки, в верхней части Гвинеи (Западная Африка). Вольта образуется из множества рек. Главнейшие

из них: Западная, или Черная Вольта (Китаму, Адере) и Восточная, или Белая Вольта (Иоде, Баливири, Моаре). Впадает Вольта в залив Бенина Атлантического океана. Длина Вольты до сих пор точно не определена [11].

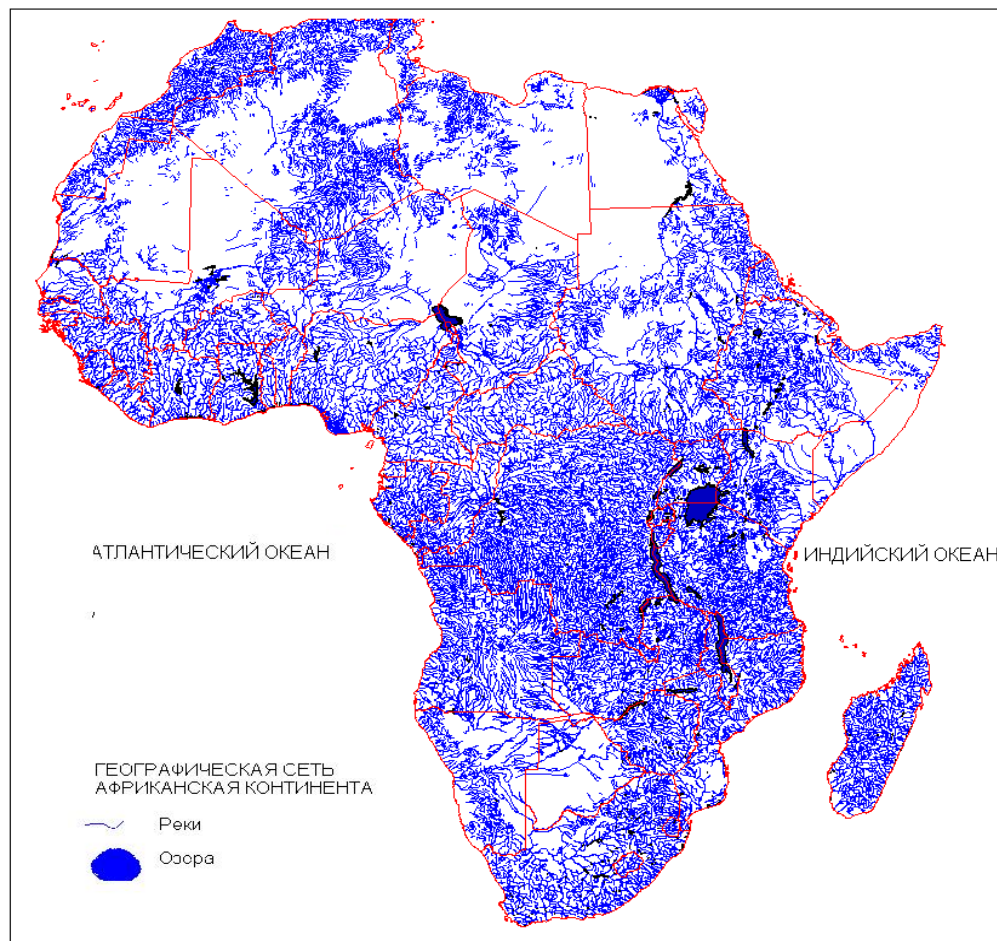


Рисунок 1.5 – Гидрографическая сеть Африки [10].

Третьей по длине и площади бассейна в Африке после Нила и Конго является река Нигер в Западной Африке, которая протекает по территории государств Мали, Нигер, Нигерия. Длина Нигера 4160 км, площадь бассейна 2092 000 км². Нигер берет свое начало на склонах Леоно-Либерийской возвышенности (под названием Джолиба) и впадает в Гвинейский залив Атлантического океана. Главные притоки: справа – Мило и Бани, слева –Сокото, Кадуна и Бенуэ. Нигер питается водами летних муссонных дождей и характеризуется сложным водным режимом. В верхнем течении паводок начинается в июне и достигает максимума в сентябре–октябре. В нижнем течении

подъем воды начинается в июне от местных дождей, в сентябре он достигает максимума, далее уровень падает, но в феврале вновь повышается в связи с приходом паводка из верхней части бассейна. Средний годовой расход воды Нигера в устье равняется $8630 \text{ м}^3/\text{с}$, годовой сток – 378 км^3 , расходы во время паводков могут достигать от 30 до $35\,000 \text{ м}^3/\text{с}$ [12, 13].

Река Конго протекает в Экваториальной Африке, в Заире, частично по границам Народной Республики Конго и Анголы. Конго впадает в Атлантический океан. Длина от истока Луалабы 4320 км, от истока Чамбези – свыше 4700 км. Площадь бассейна $3\,691\,000 \text{ км}^2$. Бассейн Конго расположен в пределах Заира (свыше 60% общей его площади), Народной Республики Конго, Камеруна, Центральноафриканской Республики, Руанды, Бурунди, Танзании, Замбии и Анголы [14].

В формировании стока рек бассейна Конго преобладающую роль играет обильное дождевое питание. В годовом ходе уровня отчетливо выражены два подъема и два спада. На среднем Конго подъем воды наблюдается в ноябре–декабре под влиянием паводков на северных притоках. В низовьях Конго главный подъем также приходится на ноябрь–декабрь. Среднегодовые расходы воды в нижнем течении Конго составляют $39\,000 \text{ м}^3/\text{с}$ [15].

Южноафриканский район включает бассейны рек Касаи (левого притока Конго), Лимпопо, Оранжевой [12].

Оранжевая река (Orange River), иначе Гарип (Gareep, Gariep) – самая значительная река южной части Африки. Ее длина равняется 2140 км, площадь речного бассейна $1\,275\,000 \text{ км}^2$. Берет свое начало на западной стороне гор Катламба, образуясь двумя притоками, один из которых южный, называется Ну-Гарип, или Черная река, а также Оранжевая, а северный – Гей-Гарип, или Ваал-река (Желтая река) [9].

Лимпопо река на юго-востоке Африки, протекает в ЮАР, частично на границе с Ботсваной и Зимбабве, и Мозамбике. Длина реки равняется 1800 км, площадь бассейна $440\,000 \text{ км}^2$. Берет свое начало в горах Витватер-

сранд и протекает по Мозамбикской низменности, впадает в Индийский океан. Средний расход воды в устье имеет значение $800 \text{ м}^3/\text{с}$ [12].

1.2 Климатические сценарии и возможные климатические изменения в Африке

В настоящее время факт изменения климата признается всеми ведущими странами мира. Официальным международным источником, публикующим данные об изменении климата и сценарии изменения климата, является сайт Межправительственной группы по изменению климата (IPCC) <http://www.ipcc.ch/> [16].

По данным IPCC в 2007 году концентрация углекислого газа CO_2 в атмосфере составляла 380 ‰. Эта концентрация увеличивается с каждым годом от деятельности человека. Некоторые ученые-климатологи и экономисты считают, что безвредная концентрация для экосистемы и экономики стран не должна превышать 450 ‰ [17].

Исследования ледниковых отложений сделали заметными воздействия человека на естественный ход природных процессов. Обнаружено, что повышается антропогенная концентрация атмосферных нитратов и сульфатов: за последние сто лет содержание во льду анионов SO_4^{2-} выросло в от трех до четырех раз, а с 1950-х годов начала расти концентрация NO_3^- , к настоящему времени она удвоилась из-за выбросов автотранспорта.

Главное влияние на климат, по мнению IPCC, человечество оказывает увеличением выбросов аэрозолей, а главное, парниковых газов: CO_2 , CH_4 , NO_2 , и фреонов. Например, детальные наблюдения за концентрацией CO_2 в атмосфере ведутся уже многие годы на обсерватории Мауна-Лоа и на Южном полюсе на станции Восток. По данным этих станций с начала 19-го века по 80-е годы 20-го века она выросла с 285 ‰, что типично для межледниковых условий, до 335–338 ‰. Этому нет аналогов в данных из скважины со

станции Восток. Современная концентрация метана в атмосфере равна 1,7 ‰ что в 2,5 раза больше максимума, выявленного по керну из района станции Восток [16].

Если сравнить современные концентрации парниковых газов с определенными по ледниковому керну для доиндустриальной эпохи, оказывается, что за последние 200 лет их рост составил: 25 % для CO₂, 100 % для CH₄, от 8 до 10 % для NO₂ [16].

На рисунке 1.6 показаны результаты численного моделирования глобального климата, которые в прогнозах имеют линейную или логарифмическую зависимость между изменениями температуры воздуха и изменением концентрации парниковых газов в атмосфере. Верификация моделей глобального климата на данных изменения температуры в 20-м веке показала удовлетворительные результаты.

Для прогноза изменения температуры воздуха в 21-м веке IPCC предлагает следующее уравнение:

$$T(x, y, t) \approx T_{IPCC}(x, y, t) \pm \Delta T_P(x, y, t), \quad (1.1)$$

где $T(x, y, t)$ – прогнозная температура приземного воздуха;

$T_{IPCC}(x, y, t)$ – прогнозная температура;

$\Delta T_P(x, y, t)$ – циклическое изменение температуры воздуха.

Уравнение (1.1) может иметь следующую уточненную форму:

$$T(x, y, t) \approx T_{IPCC}(x, y, t) \pm F(\omega), \quad (1.2)$$

где $F(\omega)$ – функция, которая задает колебания температуры;

ω – циклическая частота колебаний температуры.

a)

б)

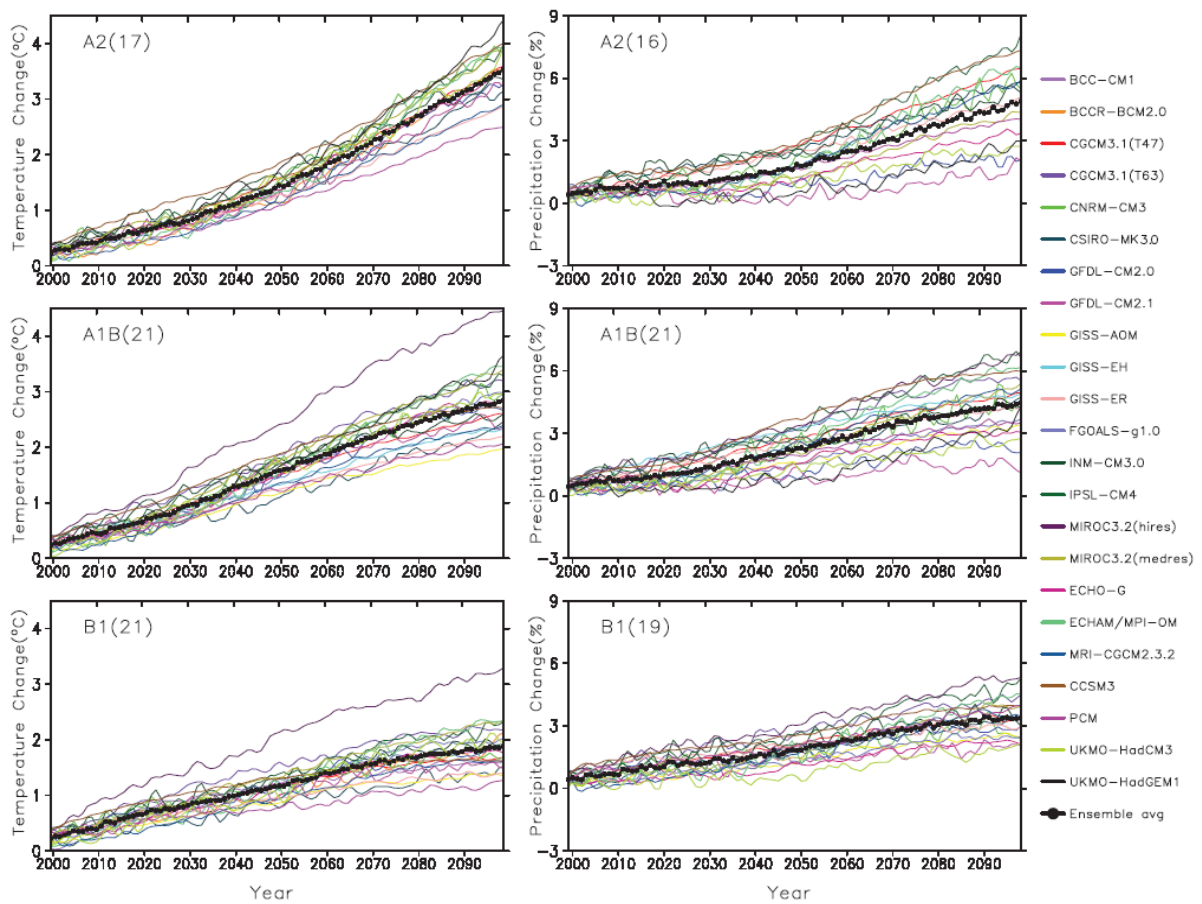


Рисунок 1.6 – Тенденции в изменении нормы температуры (а) и нормы осадков (б) по различным климатическим сценариям и моделям [16].

В качестве примера приводится следующая форма записи уравнения:

$$T(x, y, t) \approx T_{IPCC} + k \sin \alpha, \quad (1.3)$$

где k – эмпирический коэффициент, зависящий от географической широты (имеет максимальное значение ближе к полюсу и стремится к нулю у экватора).

Развивается новый подход в описании возможных региональных и глобальных климатических изменений (который будет полностью представлен в пятом докладе IPCC), базирующийся на композиции «парникового» и «циклического» эффектов:

$$\Delta T \approx \Delta T_{\text{IPCC}} + k \sin \omega t. \quad (1.4)$$

Данный подход позволит объяснить не только рост температуры, вызванный эмиссией парниковых газов, но и изменчивость климата (в частности наблюдавшееся похолодание в 1940–1970-х годах). Привлечение информации об циклических изменениях процессов на Земле открывает дополнительную возможность для понимания природы климатических изменений [16].

На Африканском континенте процесс изменения климата сказывается на изменении осадков и, в основном, на увеличении температуры воздуха. В 20-м веке годовые изменения осадков наблюдались на большей части Африки: в Сахаре, в восточной и юго-восточной Африке [18].

Изменения температуры и количества осадков с 1900 по 1998 года в Сахаре, в восточной и юго-восточной Африке показаны на рисунке 1.7 [19]. Пунктирной линией представлены температурные отклонения, а сплошной линией отклонения осадков относительно периода 1961–1990 гг. Средние линии получены путем осреднения по десятилетиям.

Наибольшие изменения и осадков и температуры наблюдаются в Сахаре. Средние температуры Восточной Африки имеют относительно стабильный режим, в Юго-Восточной Африке наблюдаются изменения в средних значениях группируемых по десятилетиям. В последнее десятилетие 20-го века в Сахаре осадков выпадало в среднем 371 мм, что мало отличается от периода с 1961 по 1990 год. Хотя последний тридцатилетний период можно отнести к засушливому (на 25 % меньше нормы). В Восточной Африке, 1997 год был очень многоводный и, как в 1961 и 1963 годах, привел к росту уровня Озеро Виктория [20]. В работе [21] предполагается, что эти многоводные годы связаны с влиянием Индийского океана.

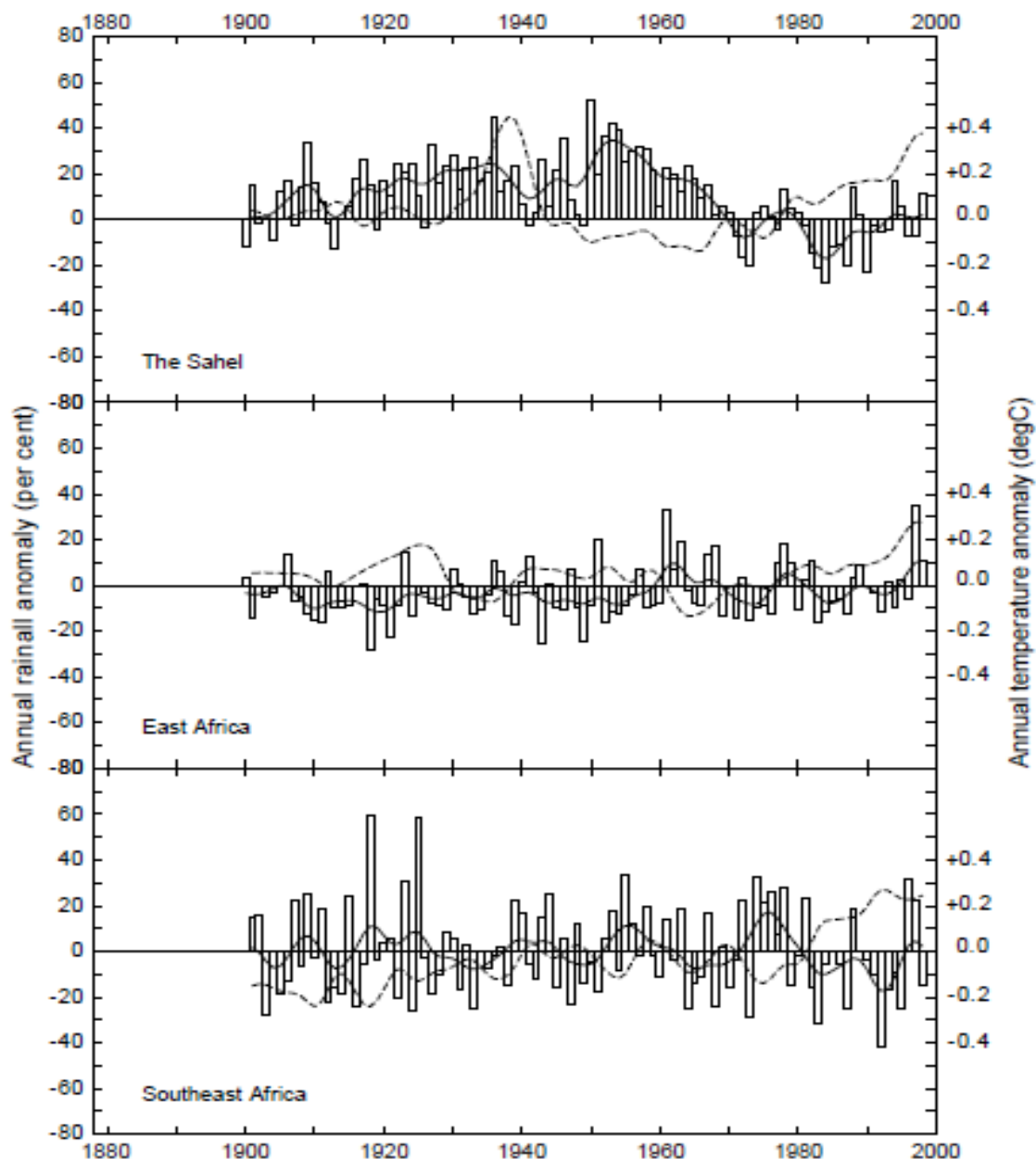
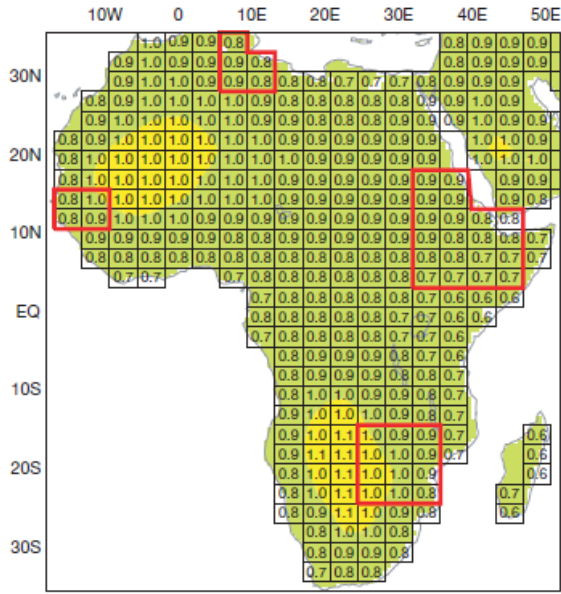


Рисунок 1.7 – Изменения годовых осадков и температуры с 1900 по 1998 год [19].

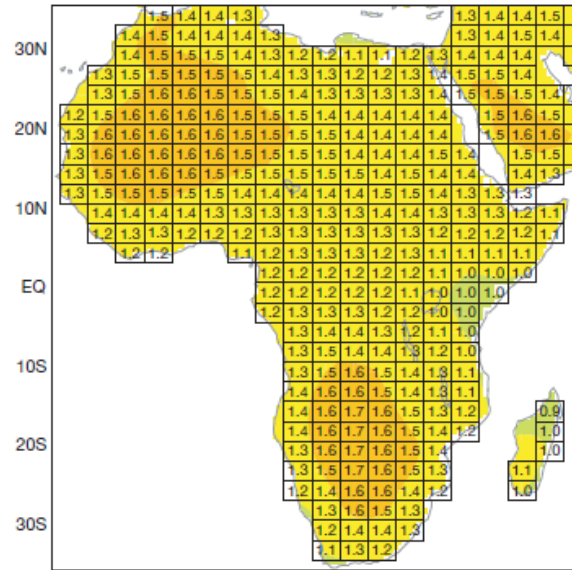
Работе [22] отмечено, что Африканский континент стал теплее, чем это было 100 лет назад. Потепление в 20 веке шло со скоростью примерно $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тренд на теплый период начинается с 1987–1998 в зависимости от регионов.

Будущее потепление по всей Африке колеблется от менее $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в десятилетие (рисунок 1.8) до более чем $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в десятилетие (рисунок 1.9) [22]. Это потепление затронет, в основном, полузасушливые тропические края Сахары и центрально-южную Африку.

a)



б)



в)

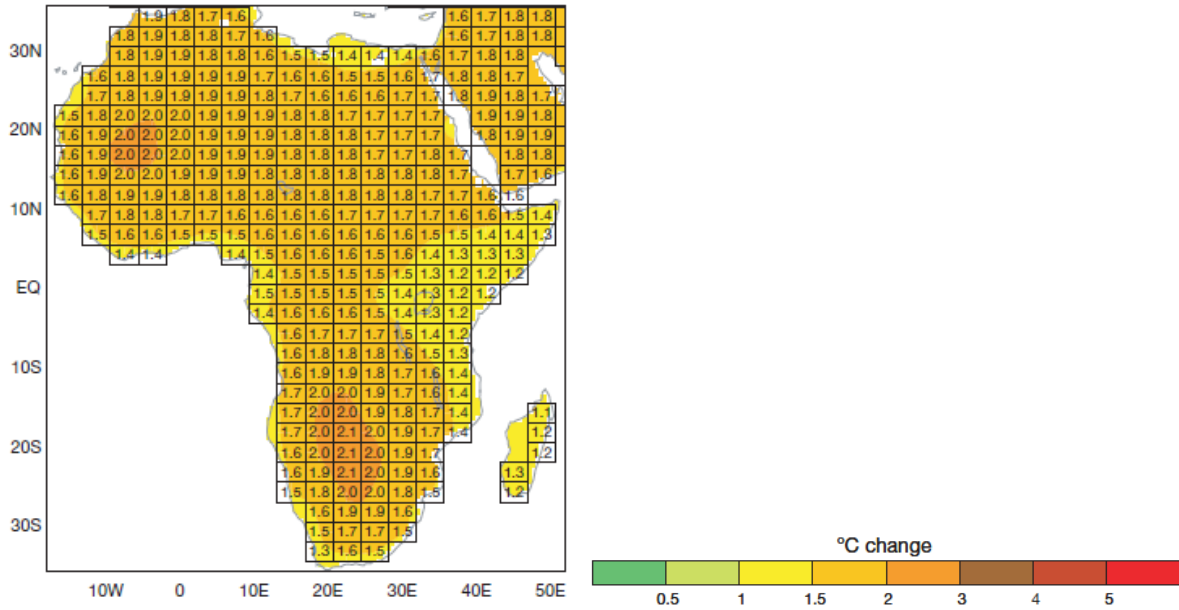
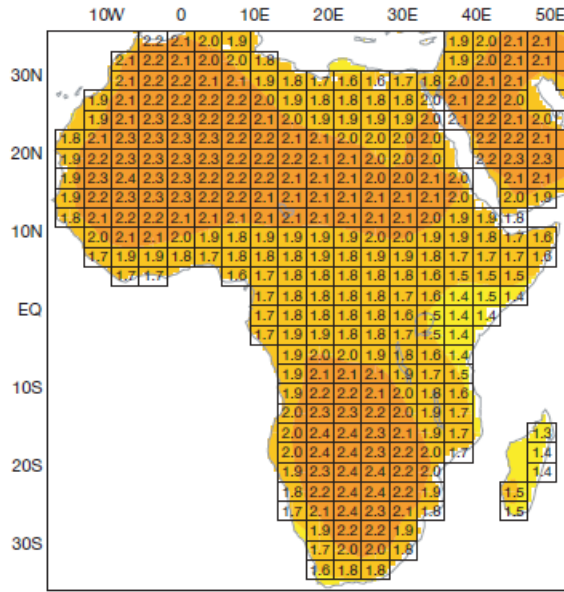
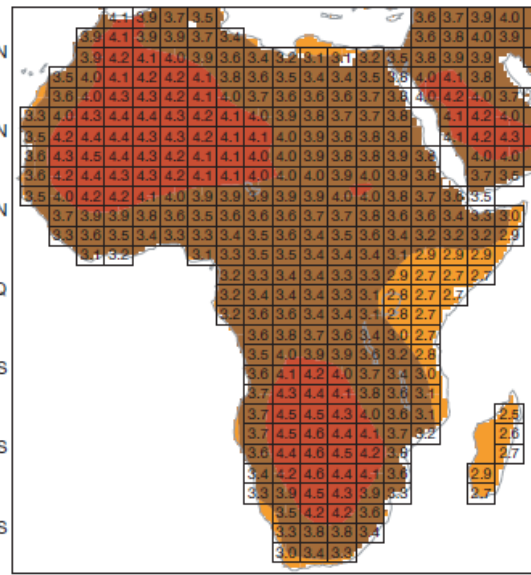


Рисунок 1.8 – Изменения нормы среднегодовой температуры на 2020 (а), 2050 (б) и 2080 (в) года по благоприятному климатическому сценарию (B1, описание сценария см. ниже) [22].

a)



б)



в)

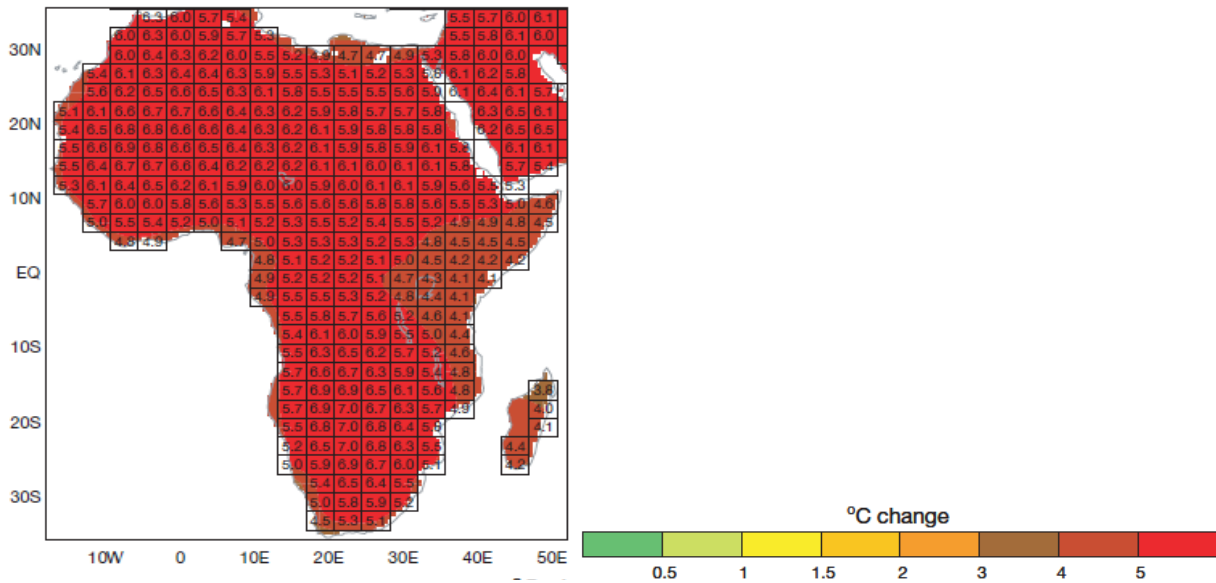


Рисунок 1.9 – Изменения нормы среднегодовой температуры на 2020 (а), 2050 (б) и 2080 (в) года по неблагоприятному климатическому сценарию (А2, описание сценария см. ниже) [22].

Будущие изменения в осадках (средних сезонных) в Африке определены менее четко. По сценарию В1 некоторые регионы в Африке испытывают изменение в количестве осадков, превышающее среднеквадратическое отклонение, либо в зимний период (декабрь, январь, февраль), либо в летний

(июнь, июль, август). В части экваториальной Восточной Африки количество осадков увеличивается на 5 до 30% в зимний период и уменьшается на 5 до 10% в летний период.

По сценарию А2 на большой площади экваториальной Африки количество осадков в зимний период увеличится от 50 до 100 %, а в Южной Африке и вдоль побережья Средиземного моря уменьшится от 15 до 25 %. В летний период ожидается значительное уменьшение осадков в северо-западной Африке и увеличение количества осадков в бассейне р. Нигер и в районе озера Чад.

По большинству климатических сценариев, которые предполагают неизменную тенденцию в выбросах парниковых газов, потепление на Африканском континенте будет продолжаться и может достигать в среднем от 2 до 6 °С к 2100 году.

Информация по климатическим сценариям и прогнозные метеорологические характеристики по ним опубликованы в открытом доступе на официальном сайте Центра распространения данных (DDC) группы IPCC [16].

Наиболее актуальны сценарии последнего четвертого доклада (AR4) 2007 года, содержащего оценки наблюдаемых изменений климата [16]: Scenario 1PTO2X, Scenario 1PTO4X, Scenario 20C3M, Scenario Commit, Scenario PICTL, Scenario SRA1B, Scenario SRA2, Scenario SRB1. Кратко дадим характеристику каждому сценарию:

– сценарий 1PTO2X: концентрация парниковых газов увеличивается со скоростью 1 % в год от базового 1990 года до двойной концентрации, после остается постоянной;

– сценарий 1PTO4X: увеличение концентрации парниковых газов происходит со скоростью 1 % в год до концентрации большей в 4 раза по сравнению с 1990 г., после концентрация принимается постоянной;

– сценарий 20C3M: увеличение парниковых газов происходит с такой же скоростью, что и в 20 веке;

- сценарий Commit: «идеальный» сценарий, по которому скорость изменения концентрации парниковых газов остается на уровне 2000 года;
- сценарий PICTL: концентрация парниковых газов постепенно возвращается к уровню 1990 года;
- сценарий SRA1B: сценарий очень быстрого экономического развития и роста численности населения; максимум достигается в середине столетия и после этого снижается, так как развиваются новые и более эффективные технологии с альтернативными источниками энергии;
- сценарий SRA2: по этому сценарию происходит непрерывное увеличение численности населения на Земле, локальный экономический рост, который приводит к медленному развитию новых технологий;
- сценарий SRB1: сценарий похожий на SRA1B, но с еще более быстрым темпом экономического развития и ростом численности населения.

Каждый сценарий содержит прогнозные модели. Разнообразие моделей связано с количеством мировых исследовательских институтов и центров в разных странах, занимающихся изменениями климата. Подробное описание прогнозных моделей не распространяется. Наиболее распространенной моделью климатических изменений, используемой в водноресурсных прогнозах, является HadCM3 [23].

1.3 Постановка задач диссертации

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 для дальнейшего выявления географических закономерностей появления аномально опасных зон полей многолетнего годового речного стока.

Для достижения сформулированной цели надо решить следующие задачи:

- создать базы данных по годовому стоку, осадкам и приземной температуре воздуха по 114 пунктам наблюдений на территории Юго-Западной Африки;

- с использованием стандартных методик, принятых в России, сформировать ряды многолетнего годового стока, удовлетворяющие требованиям по их статистической обработке и вычислить расчетные гидрологические характеристики для дальнейшего картирования и использования при оценке степени устойчивости начальных моментов вероятностных распределений многолетнего годового стока;

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

- для климатических сценариев Commit, SRA1B, SRA2, SRAB1 получить и закартировать оценки расчетных гидрологических характеристик на 2039–2070 гг. для Юго-Западной Африки, включающей 35 государств;

- выявить и закартировать зоны статистически значимых отклонений (аномалий) прогнозных характеристик от фактических и сделать оценки (качественного характера) возможных последствий для экономики появления аномальных зон;

- выполнить качественные оценки возможных последствий изменения климата для ряда водозависимых отраслей экономики и провести количественную оценку оптимальной плотности режимной гидрологической сети для условий существующего и ожидаемого климата.

2 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДОЛГОСРОЧНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГОДОВОГО СТОКА

2.1 Математическая модель формирования стока и ее применение для долгосрочного прогнозирования

Все виды многолетнего речного стока на практике описываются одно-модальными асимметричными кривыми плотности вероятности. Эти кривые входят в семейство кривых Пирсона, которые являются решением уравнения

$$\frac{dp}{dQ} = \frac{Q - a}{b_0 + b_1Q + b_2Q^2} p, \quad (2.1)$$

где p – плотность вероятности расхода воды Q , м³/с;
 a, b_0, b_1, b_2 – коэффициенты.

На практике кривую плотности вероятности $p(Q)$ аппроксимируют тремя начальными моментами $m_n = \int_{-\infty}^{\infty} Q^n p(Q) dQ$ ($n = 1, 2, 3$), которые характеризуют одномодальную кривую.

В уравнении Пирсона 2.1 коэффициенты a, b_0, b_1, b_2 служат для лучшего подбора аналитической кривой эмпирическим точкам, «но никакой связи с динамикой формирования стока, с физико-статистическими свойствами бассейнов и внешними воздействиями на них, на момент внедрения модели 2.1 в гидрологию, не давали» [24].

Однако есть генетическая модель формирования стока, дающая решение в виде кривых плотности вероятности, и при использовании которой у коэффициентов появляется физико-статистический смысл:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{1}{k\tau}Q + \frac{X}{\tau}, \quad (2.2.)$$

где k – коэффициент стока;

τ – время релаксации речного бассейна.

В модель 2.2 вводятся белые шумы $1/k\tau = c = \bar{c} + \tilde{c}$, $X/\tau = N = \bar{N} + \tilde{N}$ с интенсивностями $G_{\tilde{c}}$, $G_{\tilde{N}}$, $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$. После этого получается стохастическая модель линейного формирующего фильтра, который преобразует случайный процесс осадков в марковскую последовательность расходов в замыкающем створе речного бассейна.

Стохастической модели статистически эквивалентно уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК):

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Q}(Ap) + 0,5\frac{\partial^2}{\partial Q^2}(Bp), \quad (2.3)$$

которое описывает эволюцию (изменение во времени) кривой плотности вероятности за счет коэффициентов сноса (A) и диффузии (B).

Модель ФПК при стационарном режиме переходит в уравнение Пирсона, но с коэффициентами, которые связаны с факторами формирования стока: $a = (G_{\tilde{c}\tilde{N}} + 2\bar{N})/(2\bar{c} + G_{\tilde{c}})$; $b_0 = -G_{\tilde{N}}/(2\bar{c} + G_{\tilde{c}})$; $b_1 = G_{\tilde{c}\tilde{N}}/(2\bar{c} + G_{\tilde{c}})$; $b_2 = -G_{\tilde{c}}/(2\bar{c} + G_{\tilde{c}})$. Уравнение ФПК может считаться базисной моделью гидрологии. Оно позволяет решить гидрологические проблемы, связанные с оценкой гидрологических последствий изменения климата и влиянием антропогенных воздействий на водный режим бассейнов.

Плотность вероятности задается определенным числом моментов: $p(Q) \sim m_1, m_2, m_3, \dots$. Уравнение ФПК 2.3 аппроксимируется системой уравнений для моментов:

$$\begin{aligned}
dm_1/dt &= -(\bar{c} - 0,5G_{\tilde{c}})m_1 - 0,5G_{\tilde{c}\tilde{N}} + \bar{N}; \\
dm_2/dt &= -2(\bar{c} - G_{\tilde{c}})m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_1 + G_{\tilde{N}}; \\
dm_3/dt &= -3(\bar{c} - 1,5G_{\tilde{c}})m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7,5G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_2 + 3G_{\tilde{N}}m_1; \\
dm_4/dt &= -4(\bar{c} - 2G_{\tilde{c}})m_4 + 4\bar{N}m_3 - 14G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_3 + 6G_{\tilde{N}}m_2.
\end{aligned} \tag{2.4}$$

При проведении долгосрочной оценки вначале по рядам наблюдений вычисляются m_n , затем производится параметризация уравнений для моментов 2.4 – находятся численные значения параметров, отвечающие за формирование плотности вероятности и связанные с физико-географическими свойствами бассейна. Затем найденные параметры изменяются за счет факторов подстилающей поверхности или/и за счет климата. Далее производится вычисление новых оценочных моментов m_n , по которым определяются расчетные гидрологические характеристики (норма, коэффициенты вариации и асимметрии).

При прогнозе использовался упрощенный вариант методики, который адаптирован к практическому применению [25]. Адаптация заключалась в ряде допущений: а) использовалось фиксированное отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации; б) процесс формирования многолетнего стока рассматривался как статистически стационарный, так как сами климатические сценарии предполагают метеорологические характеристики на определенный временной промежуток в несколько десятилетий статистически стационарными; в) не учитывалась интенсивность внутренних шумов $G_{\tilde{c}}$, это позволяет получать устойчивые оценки фактических и прогнозных величин.

Система 2.4 сводится к двум алгебраическим уравнениям для m_1 и m_2 в которых присутствует только $a = 2\bar{N}/2\bar{c}$ и $b_0 = -G_{\tilde{N}}/2\bar{c}$; параметры характеризующие интенсивности шумов $G_{\tilde{c}}, G_{\tilde{c}\tilde{N}}, G_{\tilde{N}}$ принимаются постоянными, но в данном упрощении используется только один параметр $G_{\tilde{N}}^{\text{пр}} = G_{\tilde{N}}$.

Таким образом, для оценки гидрологических последствий изменения климата для рек Юго-Западной Африки использовалась следующая система уравнений:

$$-\bar{c}m_1 + \bar{N} = 0, \tag{2.5}$$

$$-2\bar{c}m_2 + 2\bar{N}m_1 + G_{\tilde{N}} = 0.$$

где \bar{c} – математическое ожидание параметра обратного коэффициенту многолетнего стока;

m_1, m_2 – первый и второй начальные моменты, зная которые можно определить норму и коэффициент вариации стока;

\bar{N} – норма осадков;

$G_{\tilde{N}}$ – интенсивность белого шума осадков.

Так как $\tau = 1$ (рассматривается многолетний годовой сток), то $\bar{c} = 1/\bar{k}$, $\bar{N} = \bar{X}$. Сначала, зная m_1, m_2 и \dot{X} находим \bar{c} и $G_{\tilde{N}}$. Затем, определяется прогнозное значение коэффициента стока. Используется выражение для коэффициента стока $k = \bar{Q} / \dot{X} = 1 - \bar{E} / \bar{X}$, полученное из уравнения водного баланса для замкнутых речных водосборов ($\bar{Q} = \bar{X} - \bar{E}$). Коэффициент стока связывается с параметрами, которые фигурируют в климатических сценариях ($\bar{T} \text{ } ^\circ\text{C}$ и \bar{X}), путем использования формулы Н.А. Багрова ($E = f(\dot{X}, E_0)$) (здесь E_0 – испаряемость) и Л. Тюрка ($E_0 = f(T)$) [25]:

$$k = 1 - \text{th}((300 + 25\bar{T} + 0,05\bar{T}^3) / \bar{X}). \tag{2.6}$$

По формуле 2.6 рассчитывается прогнозное значение коэффициента стока $k_{\text{пр}}$, подставляя прогнозные нормы осадков и температуры воздуха. В

новом климате величина $G_{\tilde{N}}$ останется прежней, так как в сценарии нет информации о возможном изменении дисперсии осадков. Используя систему 2.5, находят прогнозные значения начальных моментов $m_1^{\text{пр}}$, $m_2^{\text{пр}}$, а затем – прогнозные значения коэффициента вариации $C_v^{\text{пр}}$ ($C_v = \sqrt{m_2 - m_1^2} / m_1$). Прогнозный коэффициент асимметрии находится по соотношению с коэффициентом вариации при современном климате.

2.2 Устойчивость вероятностных характеристик многолетнего стока

Критерий устойчивости получается из стохастической модели формирования стока, к которому применяется процедура стохастического обобщения, и получается уравнение ФПК [26 – 28], которое, в свою очередь, аппроксимируется системой уравнений для моментов m_n :

$$dm_n / dt = nM[AQ^{n-1}] + 0,5n(n-1)M[BQ^{n-1}], \quad (2.7)$$

где m_n – порядок n -ого порядка;

A, B – коэффициенты сноса и диффузии.

Уравнение 2.7 выше было записано в виде системы 2.4, из которой видно, что при $\bar{c} < 0,5nG_{\bar{c}}$ производная $dm_n/dt > 0$, т. е. $m_n \rightarrow \infty$. Это и есть формальный признак неустойчивости. Если обозначить $\beta = G_{\bar{c}} / \bar{c}$, то неустойчивость для момента n -го порядка m_n возникает при $\beta > 2/n$ ($m_3 - \beta > 2/3$, $m_2 - \beta > 1$), т. е. критерий устойчивости имеет следующий вид [28, 29]:

$$\beta = G_{\bar{c}} / \bar{c} < 2 / n, \quad (2.8)$$

где β – критерий устойчивости.

Чем старше момент, тем меньшая относительная интенсивность шума G_{τ} требуется для его неустойчивости. По старшим моментам речной сток оказывается неустойчивым [26]. Гидрологи строят распределения с использованием второго и третьего моментов, т. е. часто заведомо неустойчивые распределения. Отсутствие устойчивости по всем трем моментам говорит о том, что ряды расходов в рамках рассматриваемой модели не представляют собой статистическую совокупность [24].

В РГГМУ был разработан способ практического вычисления значений параметра β . Из уравнения ФПК следует выражение для нормированной автокорреляционной функции

$$r = \exp[-(\bar{c} - 0,5G_{\tau})\tau], \quad (2.9)$$

где r – нормированная автокорреляционная функция.

При годовой сдвигке ($\tau = 1$) уравнение 2.9 сводится к выражению

$$\beta = 2k \ln r + 2, \quad (2.10)$$

где r – значение коэффициент автокорреляции при годовой сдвигке.

Для вычисления критерия устойчивости по выражению 2.10 необходимо знание численных значений величин k и r .

Критерий устойчивости уж был определен для Северной и Западной частей Африки [30, 31]. Было получено, что на территории Северо-Западной Африки имеются районы с устойчивым режимом формирования стока и неустойчивым – в основном в пустынных районах с преобладающим влиянием испарения в многолетних водных балансах речных бассейнов (рисунок 2.1).

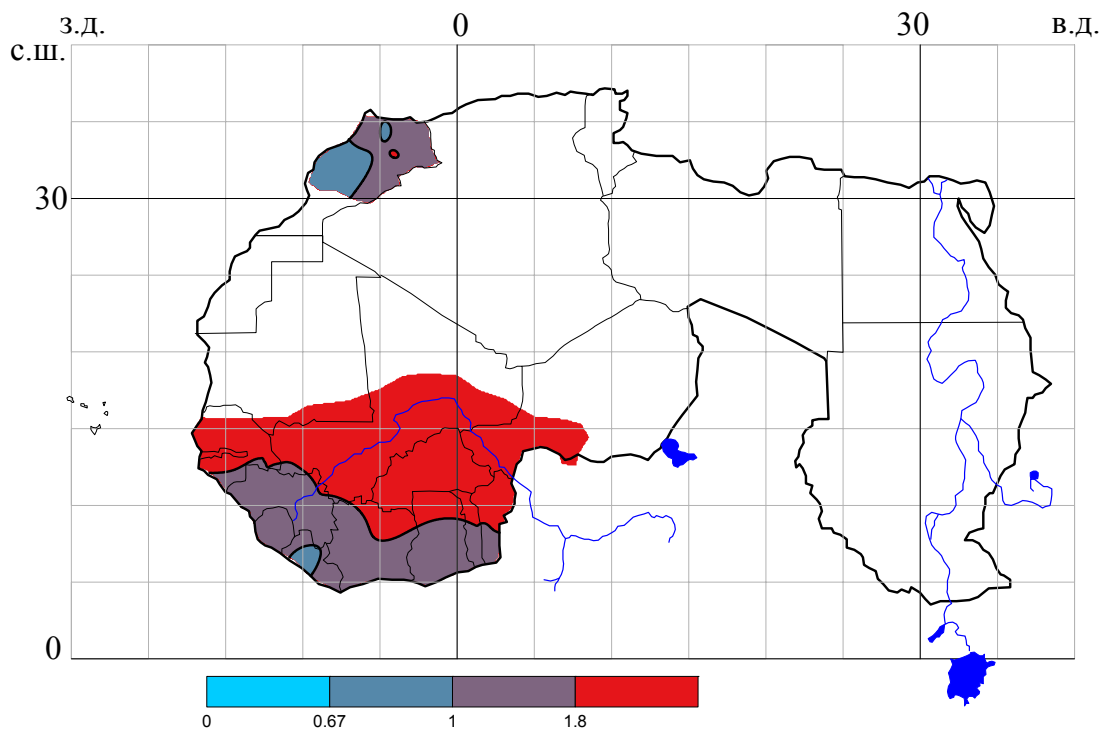


Рисунок 2.1 – Зоны неустойчивости на территории Северо-Западной Африки [31].

3 СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ ЮГО-ЗАПАДНОЙ АФРИКИ

В настоящее время в инженерной гидрологии основным инструментарием гидрологического обоснования проектных решений в водозависимых отраслях экономики и гидроэкологии являются статистически обеспеченные значения характеристик, например расходов воды и наносов, а также уровней водных объектов. Для их получения нужны либо фактические ряды наблюдений, либо построенные по ним карты модуля стока, коэффициента вариации, отношения коэффициента вариации к коэффициенту асимметрии.

Статистические методы обработки гидрологической информации являются важнейшей составной частью прикладной гидрологии. Методы математической статистики и теории вероятностей используются при проведении гидрологических, водохозяйственных и гидроэнергетических расчетов, при составлении гидрологических прогнозов, в процессе экологического мониторинга, при оценке экономической эффективности водохозяйственных проектов и т. д.

Многие гидрологические характеристики (среднегодовой, максимальный и минимальный расходы воды, слой стока за половодье или за паводок, продолжительность половодья или межени) определяются огромным числом факторов, степень влияния каждого из которых учесть практически невозможно, при этом конкретное значение характеристики есть результат случайного сочетания этих факторов. С учетом этого, сама исследуемая характеристика должна рассматриваться как случайная величина, и для ее определения могут быть использованы методы теории вероятностей и математической статистики. Кроме того, в практике гидропрогнозов часто встречаются задачи, когда необходимо определить значения гидрологических величин, которые будут встречаться в будущем, например в период эксплуатации того или иного гидротехнического сооружения. Определение расчетных гидрологиче-

ских характеристик должно основываться на данных гидрометеорологических наблюдений, а при необходимости на дополнительном учете данных инженерно-гидрологических изысканий. При определении расчетных гидрологических характеристик необходимо применять следующие приемы расчетов: а) при наличии данных гидрометрических наблюдений непосредственно по этим данным; б) при недостаточности данных гидрометрических наблюдений – приведением их к многолетнему периоду по данным рек-аналогов с более длительными рядами наблюдений; в) при отсутствии данных гидрометрических наблюдений – по формулам с применением данных о реках-аналогах и картам, основанных на совокупности данных наблюдений всей сети гидрометрических станций и постов данного района или более обширной территории, включая материалы инженерно-гидрологических изысканий.

Водные ресурсы поверхностных вод в Африке значительно меньше, чем на других континентах (кроме Австралии), и оцениваются величиной около 4000 км^3 [32 – 34]. В расчете на душу населения приходится около 5000 м^3 в год. Относительно малая величина водных ресурсов обусловлена природными особенностями континента, 45 % территории которого приходится на аридные и экстремально аридные регионы, и еще 22 % – на полупустынные. Оставшиеся 33 %, относящиеся к субтропическим и тропическим регионам, нередко подвержены засухам и постепенно сокращаются вследствие процесса вырубки тропических лесов и опустынивания. Африка – континент, на котором уже четыре десятилетия наблюдаются засухи на больших территориях, и проявляется тенденция снижения стока рек в регионах. Такие явления отмечены, в частности, в Юго-Западной Африке, особенно в бассейнах Нигер, Конго и Замбези. Сокращение водных ресурсов Африканских рек и увеличение частоты и продолжительности засух связаны с климатическими изменениями и с процессом постоянного наступления человека на леса и саванну. Реки основной территории Африки относятся к бассейнам Атлантического и Индийского океанов, куда впадают реки Замбези (2660 км), Лимпопо (1600 км), Рувума, Руфиджи, Джуба. В бассейне Атлантического океана впа-

дают почти все крупные реки, например, Конго (4320 км), Нигер (4160 км), Оранжевая (1860 км), Сенегал (1430 км) [35].

Еще более неблагоприятная обстановка может сложиться в связи с ожидаемыми климатическими изменениями глобального характера. Методика оценки гидрологических последствий изменения климата рассмотрена в главе 2, но для Юго-Западной Африки пока в полном виде не применялась. Основной причиной этого является отсутствие информации, необходимой для прогностических моделей. Целью данного раздела диссертации является получение требуемой информации в виде географических карт.

3.1 Формирование базы данных по гидрологическим и метеорологическим величинам

Данные по расходам воды были получены из The Global Runoff Data Centre (GRD) (D-56068 Koblenz, Germany). База данных содержала информацию по 1181 водосбору. Были отобраны только те водосборы, которые удовлетворяют условиям зональности формирования стока. В качестве нижнего предела было взято значение площади равное 1000 км^2 , в качестве верхнего – $50\,000 \text{ км}^2$. Меньшее значение в диапазоне зональных площадей соответствует водосборам, находящимся в степных и полупустынных районах [36]. Построенная редуцирующая зависимость модуля стока от площади водосбора незначительно изменила эту площадь. Зависимость представлена на рисунке 3.1. Применялась специально разработанная методика, в основе которой лежит критерий оценки однородности Стьюдента и по которой получено значение равное 650 км^2 (сама методика и промежуточные результаты будут подробно рассмотрены в главе 5).

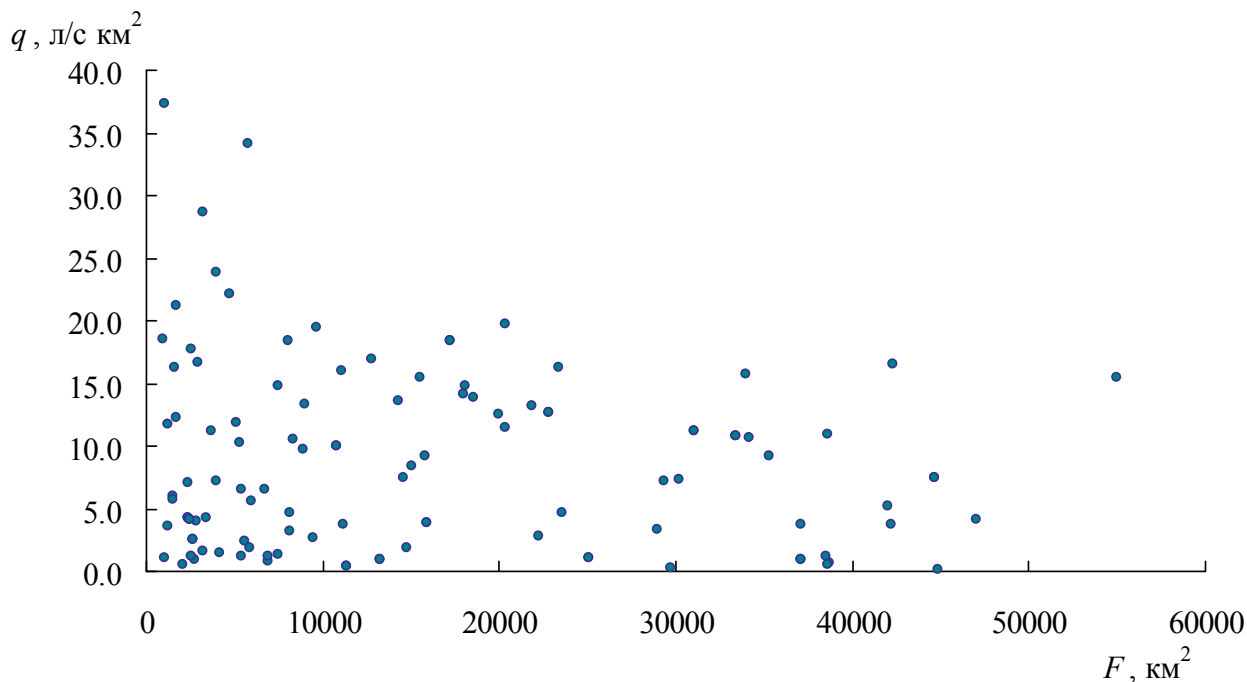


Рисунок 3.1 – Редукционная зависимость для Юго-Западной Африки.

После изъятия из рассмотрения азональных и полизональных речных бассейнов осталось всего 114 пунктов, замыкающих зональные водосборы и имеющие ряды наблюдений, достаточные для процедуры удлинения и восстановления методом гидрологической аналогии. При подборе рек-аналогов прежде всего обращалось внимание на сходства условий формирования стока в бассейнах, степени дренирования реками водоносных горизонтов (это свойство связано с размерами площади водосбора), сходство по естественной зарегулированности стока. Восстанавливаемая река и река-аналог выбирались по близкому местоположению, различие в площадях – не более чем в 5 раз, коэффициент парной корреляция больше чем 0,6.

В таблице 3.1 представлена информация по отобранным станциям (название, площади, имеющийся период наблюдений, гидрологические характеристики рядов). На рисунке 3.2 показано распределение гидрологических станций по территории Юго-Западной Африки. Из рисунка видно, что станции расположены неравномерно, некоторые страны либо не ведут наблюдения за стоком, либо не публикуют в открытом доступе данные наблюдений, например Республика Конго, Заир, Ангола, Намибия, Ботсвана, Центральная

республика Мозамбик и Танзания. Большое число станций в западной и южной Африке объясняется еще и тем, что там протекают полноводные реки с многочисленными притоками: Нигер, Сенегал, Замбези, Оранжевая.

Таблица 3.1 – Гидрологические характеристики речных бассейнов Западной и Южной Африки

Река – пост	Код поста	F , км ²	Период наблюдений, гг.	$Q_{ср}$, м ³ /с	h , мм	q , л/с км ²
MILO – KONSANKORO	1634550	1000	1952–1990	37,3	1176	37,3
TINKISSO – DABOLA	1634100	1260	1945–1994	14,9	372	11,8
NIGER – FARANAH	1634200	3180	1985–1994	91,1	903	28,6
MILO – KANKAN	1634500	9620	1944–1990	187	614	19,5
NIANDAN – BARO	1634420	12770	1944–1990	215	532	16,9
NIGER – KOUROUSSA	1634400	18000	1945–1994	254	446	14,2
SANKARANI – MANDIANA	1634800	21900	1950–1990	287	414	13,2
IRANE – KOUTAKOUKROU	1734480	1250	1948–1990	4,58	115	3,66
ALIBORI – ROUTE	1734400	8170	1948–1990	38,6	149	4,72
ALIBORI – AMONT ROUTE	1734410	8170	1948–1990	26,4	102	3,23
PENDJARI – PORGA	1731400	22280	1950–1990	61,1	86	2,74
OUEME – PONT DE SAVE	1733300	23600	1948–1990	110	148	4,69
OUEME – BONOU	1733600	46990	1948–1990	194	130	4,13
BAGOE – TOMBOUGOUI	1434780	2580	19952–1990	45,8	559	17,7
TANO – ALANDA	1530100	15800	1947–1984	144	288	9,14
FALEME – GOURBASSY	1112200	15000	1951–1990	125	263	8,35
BAFING – DAKA SAYDOU	1112480	15500	1952–1990	238	485	15,4
SANKARANI – SELINGUE	1134050	34200	1907–1990	364	335	10,6
SANKARANI – GOUALA	1134040	35300	1952–1990	323	289	9,17
KOULOUNTOU – GUE DU	1813300	5350	1904–1994	34,9	206	6,53
GAMBIA – GOULOUMBOU	1813200	42000	1904–1994	218	164	5,19
BLACK VOLTA – BANZO	1931025	2816	1952–1990	11,4	127	4,04
COMOE – DIARABAKOKO	1928745	2350	1952–1990	10,1	135	4,28
LERABA – YENDERE	1928490	5930	1952–1990	33,2	176	5,60
COMOE – FOLONZO	1928865	9480	1952–1990	24,8	82	2,62
BLACK VOLTA – NWOKUY	1931180	14800	1952–1991	26,7	57	1,80
BLACK –VOLTA BOROMO	1931370	37140	1951–1990	34,4	29	0,93
COMOE – DIARABAKOKO	1928745	2350	1952–1990	10,1	135	4,28
BLACK VOLTA – BOROMO	1931370	37140	1951–1991	34,4	29	0,93
DARGOL – TERA	1234100	2750	1952–1990	2,69	31	1,00

Продолжение таблицы 3.1

Река – пост	Код поста	F , км ²	Период наблюдений, гг.	$Q_{ср}$, м ³ /с	h , мм	q , л/с км ²
MARADI – MADAROUNFA	1234680	5400	1952–1990	6,34	6	1,17
DARGOL – KAKASSI	1234120	6940	1952–1990	5,55	31	0,80
GAROUOL – DOLBEL	1234050	7500	1952–1990	9,63	25	1,28
SIRBA GARBE – KOUROU	1234130	38750	1952–1990	24,7	20	0,64
GOROUOL – ALCONGUI	1234080	44900	1952–1990	8,93	6	0,20
TSANAGA – BOGO	1337251	1535	1952–1981	9,18	188	5,98
BIN – BEREM	1337151	1585	1952–1981	25,8	513	16,3
VINA – LAHORE	1337100	1690	1952–1981	35,8	668	21,2
NDJEKE – NGONGON	1338271	3720	1952–1981	41,7	353	11,2
MAPE – MAGBA	1338401	4020	1952–1981	96,0	752	23,9
NOUN – BAFOUSSAM	1338200	4700	1944–1981	104	698	22,2
DJA – SOMALOMO	1348100	5150	1952–1981	61,0	373	11,8
NYONG – AYOS	1339012	5300	1952–1981	54,5	324	10,3
CROSS – MAMFE	1336500	6810	1952–1981	590	273	86,7
MBERE – MBERE	1337200	7430	1952–1981	110	467	14,8
NYONG – AKONOLINGA	1339011	8350	1952–1981	88,3	333	10,6
KADEI – BATOURI	1348151	8970	1952–1981	120	422	13,4
LOM – BETARE-OYA	1338201	11100	1952–1981	178	506	16,1
NYONG – KAYA	1339015	19985	1952–1981	249	393	12,5
NTEM – NGOAZIK	1340500	18100	1952–1981	269	468	14,9
NYONG – OLAMA	1339017	18510	1952–1981	255	435	13,8
KADEI – PANA	1348152	20370	1952–1981	233	362	11,5
DJEREM – MBAKAOU	1338600	20390	1952–1981	401	620	19,7
MBAM – GOURA	1338300	42300	1952–1981	698	520	16,5
LOGONE – MOUNDOU	1537180	33970	1933–1991	535	497	15,8
KABIA – PONT CAROL	1535110	2072	1932–1991	1,17	18	0,56
MATLABAS – HAARLEM EAST	1196300	1054	1922–2001	1,12	34	1,06
MOOIRIVIER – DOORNKLOOF	1160750	1546	1952–2000	8,92	182	5,77
MKOMAZI – CAMDEN	1160700	1744	1949–2000	21,4	387	12,3
KEISKAMMA – FARM 7	1160600	2530	1949–2000	3,19	40	1,26
OLIFANTS – WOLWEKRANS	1196600	3256	1909–2001	5,27	51	1,62
KLIP – DELANGESDRIFT	1159900	4152	1906–2001	6,28	48	1,51
INCOMATI – HOOGENOEG	1197300	5540	1909–2001	13,6	77	2,45
DORING – ELANDS DRIFT	1160320	6895	1929–2001	8,46	39	1,23
TUGELA – MANDINI	1160880	28920	1947–2001	96,0	105	3,32
GROOT-VIS – OUTSPAN	1160580	29745	1949–2000	9,60	10	0,32
ORANGE – ALIWAL NOORD	1159650	37070	1915–2001	138	118	3,75
VAAL – ELANDSFONTEIN	1159800	38564	1915–2001	43,8	36	1,14
ODZI – ODZI BRIDGE	1495800	2498	1952–1990	10,4	132	4,18

Продолжение таблицы 3.1

Река – пост	Код поста	F , км ²	Период наблюдений, гг.	$Q_{ср}$, м ³ /с	h , мм	q , л/с км ²
MUNYATI – DYKE G/W	1491610	2662	1950–1990	6,72	80	2,52
MACHEKE –CONDO U/S G/W	1495720	3383	1953–1990	14,2	132	4,20
UMNIATI – STATION WEIR	1491500	5890	1941–2001	10,8	58	1,83
SAVE – CONDO D/S G/W	1495700	11174	1935–2001	41,2	116	3,69
GWAAI – KAMATIVI G/W	1491200	38600	1935–1990	21,1	17	0,55
GURUMETI – MUSOMA ROAD	1269600	13233	1951–1990	11,5	27	0,87
KILOMBERO – SWERO	1286700	33400	1950–1991	360	340	10,8
BUBU – BAHU	1287800	11400	1941–1990	5,08	14	0,45
PANGANI – KOROGWE	1289200	25110	1952–1990	26,2	33	1,05
RUVU – ROAD BRIDGE	1289450	15916	1950–1991	61,8	122	3,88
NYABARONGO – KIGALI	1870500	8900	1949–1952	86,8	307	9,76
NYABARONGO – KANZENZE	1870600	14600	1946–1990	108	234	7,44
KAGERA – RUSUMO	1870800	30200	1951–1990	223	233	7,39
GURUMETI – MUSOMA ROAD	1269600	13233	1952–1991	11,5	27	0,87
NIARI – KAYES	1445050	17190	1949–1990	315	578	18,4
KILOMBERO – SWERO	1286700	33400	1950–1990	360	340	10,8
BUBU – BAHU	1287800	11400	1950–1991	5,08	14	0,45
PANGANI – KOROGWE	1289200	25110	1950–1990	26,2	33	1,05
NYANGA – DONGUILA	1444100	5800	1950–1990	198	1077	34,2
NIARI – KAYES	1445050	17190	1951–1991	315	578	18,4
KOUILOU – SOUNDA	1445100	55010	1952–1990	850	487	15,5
NIARI – LOUDIMA	1445490	23385	1951–1990	379	511	16,2
LOUDIMA – IFAC	1445500	3990	1950–1990	28,5	225	7,13
OUHAM – BOSSANGO	1737150	22800	147–1991	288	399	12,7
FOULAKARY – KIMPANZOU	1447100	2980	1948–1991	49,6	524	16,6
OUHAM – BATANGAFO	1737210	44700	1952–1990	333	235	7,46
LOBAYE – M'BATA	1749050	31000	1954–1994	347	353	11,2
MPOKO – BOSSELE-BALI	1749080	10800	1951–1990	108	315	10,0
DJA – NGBALA	1448050	38600	1952–1990	420	343	10,9
SEMLIKI – BWERAMULE	1468050	8000	1921–2000	147	580	18,4
RUSIZI – GATUMBA	1653100	14300	1930–2001	195	430	13,7
MUREMBWE – BASSE	1653225	949,6	1950–1991	17,5	582	18,5
OUHAM – BOSSANGO	1737150	22800	1950–1991	288	399	12,7
FAFA – BOUCA	1737200	6750	1952–1991	43,7	204	6,47
LOBAYE – M'BATA	1749050	31000	1950–1990	347	353	11,2
TOMI – SIBUT	1749200	2380	1952–1991	16,8	222	7,06
MBOMOU – ZEMIO	1749600	29300	1951–2000	210	226	7,18
TANA – GARISSA	1789300	42220	1921–2000	155	116	3,68

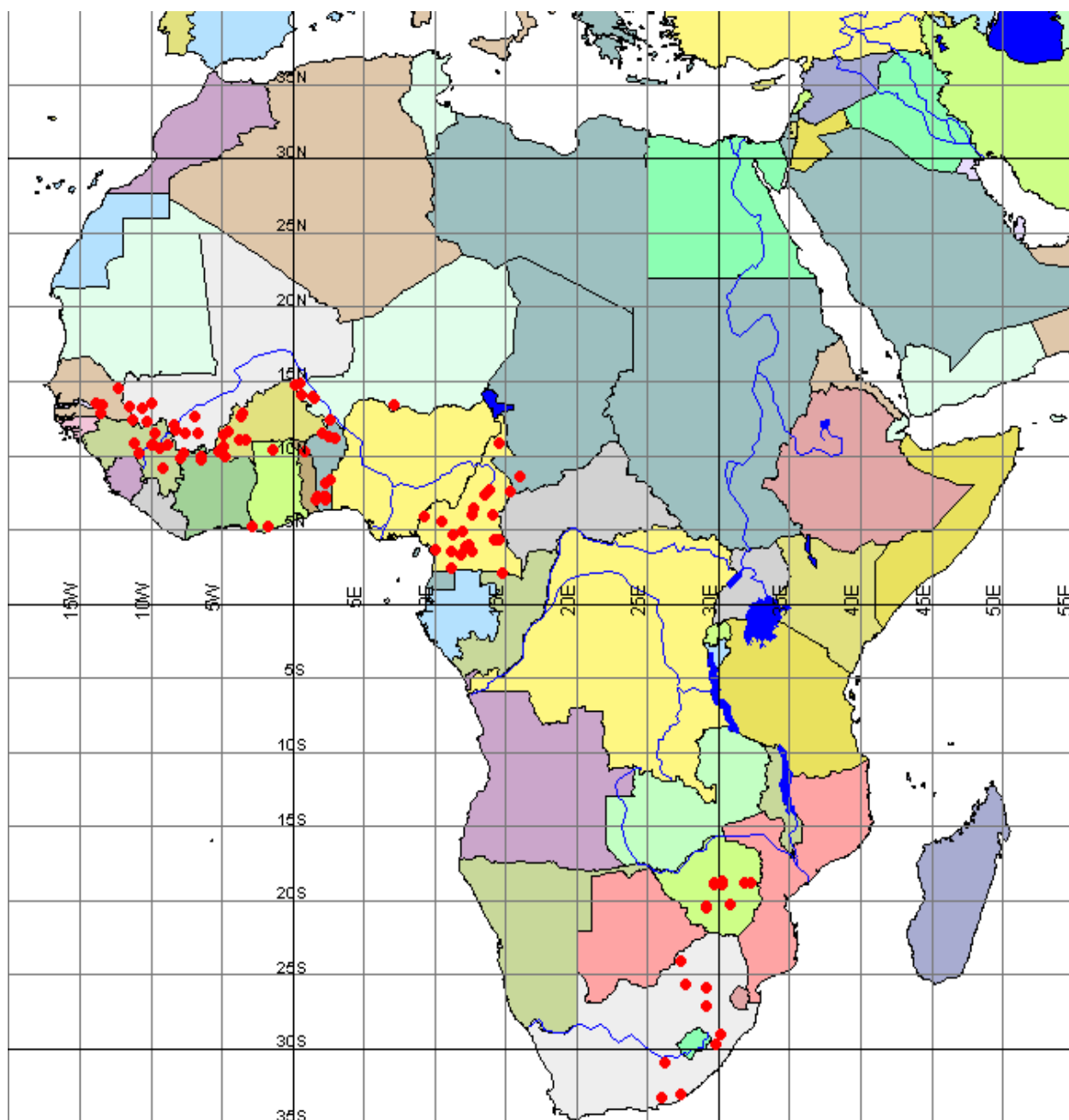


Рисунок 3.1 – Расположение на карте постов наблюдений за стоком в Юго-Западной Африке.

Были построены разностно-интегральные кривые (некоторые из них представлены на рисунке 3.2). Необходимым условием при статистической обработке рядов является наличие у рядов маловодного и многоводного периодов. Получено, что многоводная фаза длится в среднем от 1951 до 1969 года и маловодная фаза – от 1970 до 1989 года. В 1970 году отмечалось начало маловодной фазы у большинства рек Африканского континента.

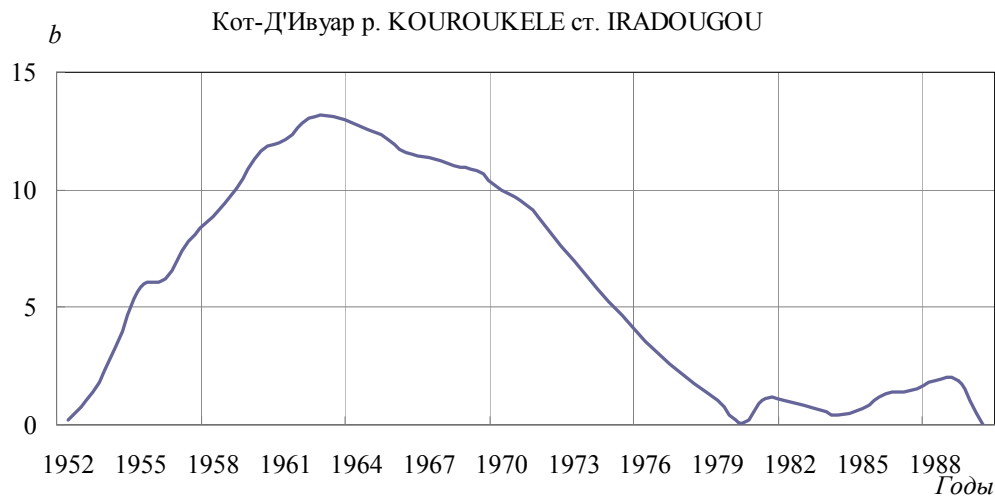
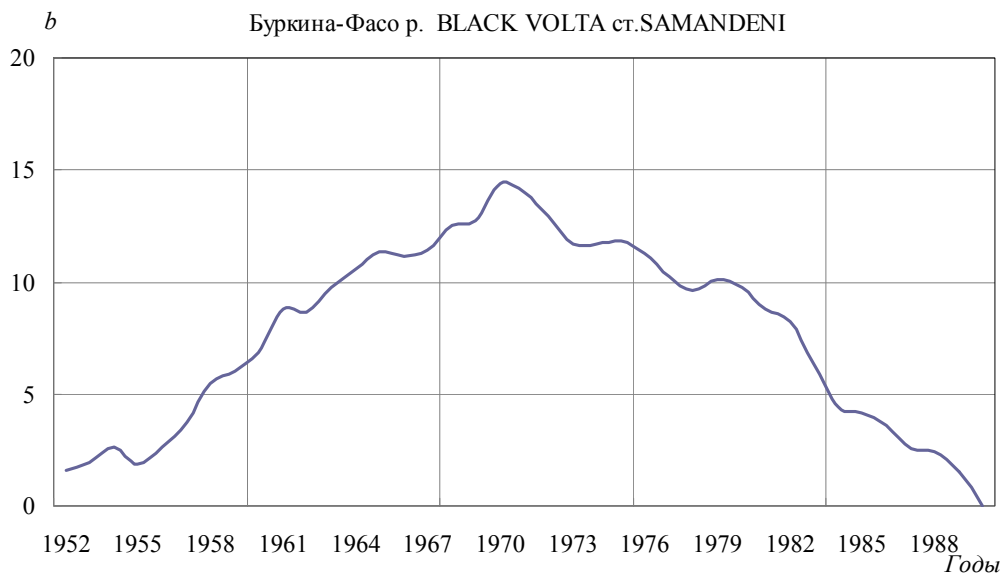
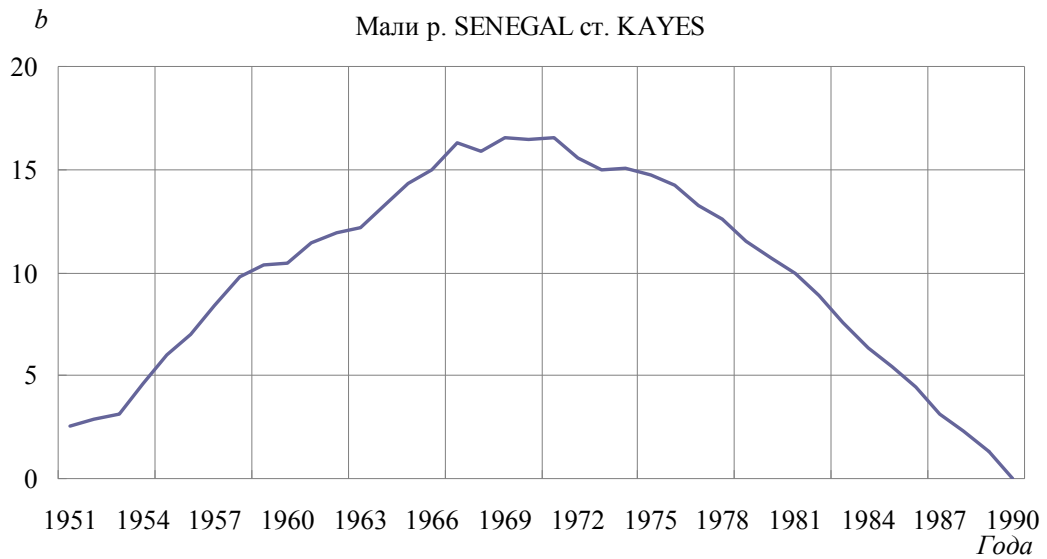


Рисунок 3.2 – Разностно-интегральные кривые ($b = \sum(k_i - 1)$, где k_i – модульный коэффициент).

Была также произведена проверка на однородность по Стьюденту и Фишеру на различных уровнях значимости. Результаты проверки показаны в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты проверки на однородность на различных уровнях значимости (у. з.)

Код поста	по Стьюденту				по Фишеру			
	10 % у.з.	5 % у.з.	2 % у.з.	1 % у.з.	10 % у.з.	5 % у.з.	2 % у.з.	1 % у.з.
1634550	+	+	+	+	+	+	+	+
1634100	–	–	+	+	+	+	+	+
1634200	+	+	+	+	–	–	–	–
1634500	–	–	+	+	+	+	+	+
1634420	+	+	+	+	+	+	+	+
1634400	+	+	+	+	–	–	+	+
1634600	–	–	–	–	+	+	+	+
1634800	+	+	+	+	+	+	+	+
1734480	+	+	+	+	+	+	+	+
1726100	+	+	+	+	+	+	+	+
1734300	–	–	–	–	+	+	+	+
1734400	+	+	+	+	–	–	–	–
1734410	–	–	–	+	+	+	+	+
1733400	–	–	–	–	–	–	–	+
1733320	–	–	–	–	–	–	–	–
1734450	–	–	–	–	–	–	–	–
1732100	–	–	+	+	–	–	+	+
1731400	+	+	+	+	+	+	+	+
1733300	+	+	+	+	+	+	+	+
1733500	–	–	–	–	–	–	–	–
1733600	–	–	+	+	+	–	–	–
1434200	–	–	–	–	+	+	+	+
1434780	+	–	+	+	+	–	–	–
1434300	+	+	–	–	+	+	+	+
1434810	–	–	–	–	+	+	+	+
1531420	–	–	–	–	–	–	–	–
1530100	+	+	+	+	+	+	+	+
1526300	–	–	–	–	–	–	–	–
1112400	–	–	–	–	–	–	–	–
1112200	–	–	–	–	–	–	+	+
1112480	–	–	–	–	–	–	–	–
1134110	–	–	–	–	–	–	–	+

Продолжение таблицы 3.2

Код поста	по Стьюденту				по Фишеру			
	10 % у.з.	5 % у.з.	2 % у.з.	1 % у.з.	10 % у.з.	5 % у.з.	2 % у.з.	1 % у.з.
1112340	–	–	–	–	–	–	–	–
1134220	–	–	–	–	–	–	–	–
1134200	–	–	–	–	+	+	+	+
1112350	–	–	–	–	–	–	–	–
1134050	–	–	–	–	–	–	–	–
1134040	–	–	+	+	+	+	+	+
1931025	–	–	–	–	+	+	–	–
1928745	+	+	+	+	+	+	+	+
1931070	–	–	+	–	–	–	+	+
1928490	–	–	–	–	–	–	–	+
1931160	–	–	–	–	–	+	+	+
1928865	–	–	–	–	–	–	–	–
1931340	–	–	–	–	–	–	–	–
1931180	–	–	–	–	+	+	+	+
1931295	–	–	–	–	–	–	–	–
1931370	–	–	–	–	+	+	+	+
1813300	–	–	–	–	–	–	–	–
1813460	–	–	–	–	–	–	–	–
1812600	–	–	–	–	+	+	+	+
1813200	–	–	–	–	+	+	+	+
1234100	–	–	–	–	–	–	–	–
1234680	+	+	+	+	+	+	+	+
1234120	+	+	+	+	–	–	–	–
1234050	+	+	+	+	+	+	+	+
1234130	+	+	+	+	+	+	+	+
1234080	+	+	+	+	+	+	+	+
1337251	+	+	+	+	+	+	+	+
1337151	+	+	+	+	+	+	–	–
1337100	+	+	+	+	+	+	+	+
1338271	+	+	+	+	+	+	+	+
1338401	+	+	+	+	–	–	–	–
1338200	–	–	+	+	+	+	+	+
1348100	+	+	+	+	+	+	+	+
1339012	+	+	+	+	+	+	+	+
1336500	–	–	+	+	+	+	+	+
1337200	–	+	+	+	–	+	+	+
1339011	+	+	+	+	+	+	+	+
1348151	+	+	+	+	+	+	+	+
1338201	+	+	+	+	+	+	+	+
1339015	–	–	+	+	–	–	–	–

Продолжение таблицы 3.2

Код поста	по Стьюденту				по Фишеру			
	10 % у.з.	5 % у.з.	2 % у.з.	1 % у.з.	10 % у.з.	5 % у.з.	2 % у.з.	1 % у.з.
1340500	+	+	+	+	+	+	+	+
1339017	+	+	+	+	+	+	+	+
1348152	+	+	+	+	+	+	-	-
1338600	+	+	+	+	+	+	+	+
1339100	-	-	-	-	-	-	-	-
1338300	-	-	-	+	+	+	-	-
1448050	+	+	+	+	+	+	+	+
1537180	+	+	+	+	+	+	+	+
1196300	+	+	+	+	+	+	+	+
1196350	+	+	+	+	+	+	+	+
1160500	+	+	+	+	+	+	+	+
1160750	+	+	+	+	+	+	+	+
1160700	+	+	+	+	+	+	+	+
1159601	+	+	+	+	+	+	+	+
1160600	+	+	+	+	+	+	+	+
1196600	+	+	+	+	+	+	+	+
1159900	+	+	+	+	+	+	+	+
1197300	+	+	+	+	+	+	+	+
1160850	+	+	+	+	-	-	-	-
1196500	+	+	+	+	+	+	+	-
1160320	+	+	+	+	+	+	+	+
1160510	+	+	+	+	+	+	+	+
1160880	+	+	+	+	+	+	+	+
1160580	+	+	+	+	+	+	+	+
1159650	+	+	+	+	+	+	+	+
1159800	+	+	+	+	-	-	-	-
1491480	+	+	+	+	-	-	-	-
1491485	+	+	+	+	+	+	+	+
1491510	+	+	+	+	+	+	+	+
1495150	+	+	+	+	-	-	-	-
1496350	+	+	+	+	-	-	-	-
1495800	+	+	+	+	-	-	-	-
1496320	+	+	+	+	+	+	+	+
1491610	+	+	+	+	+	+	+	+
1495720	+	+	+	+	-	-	-	-
1491600	+	+	+	+	-	-	-	-
1491580	+	+	+	+	-	-	-	-
1491500	+	+	+	+	-	-	-	-
1491250	+	+	+	+	-	-	+	+
1495700	+	+	+	+	+	+	+	+

Продолжение таблицы 3.2

Код поста	по Стьюденту				по Фишеру			
	10 % у.з.	5 % у.з.	2 % у.з.	1 % у.з.	10 % у.з.	5 % у.з.	2 % у.з.	1 % у.з.
1491200	+	+	+	+	+	+	+	+
Число однородных	104	104	113	114	106	106	107	114

Неоднородные ряды (при 1 % уровне значимости) в дальнейших расчетах не учитывались. Всего осталось 114 рядов наблюдений.

Данные по осадкам и температуре приземного воздуха были взяты с сайта Межправительственной группы по изменению климата [www. ipcc.org](http://www.ipcc.org) [16].

Расход воды в конкретном створе реки является интегральной характеристикой стока с водосбора / бассейна реки. Поэтому при построении карт изолиний, характеристики стока относятся к центру тяжести водосбора, который устанавливается каким-либо из геодезических (графический, весовой) способов. В связи с общеизвестными требованиями к обработке и представлению гидрологической информации определены центры водосборов (таблица 3.3, рисунок 3.3).

Таблица 3.3 – Координаты центров водосборов рек Юго-Западной Африки

Код поста	Координаты поста, град.		Координаты центра водосбора, град.	
	широта	долгота	широта	долгота
1634550	9,03	-9,00	8,85	-8,14
1634100	10,75	-11,12	10,60	-11,33
1634200	10,03	-10,75	9,64	-10,69
1634500	10,38	-9,30	10,46	-7,11
1634420	10,60	-9,73	9,67	-9,88
1634400	10,65	-9,87	10,13	-10,57
1634800	11,37	-9,61	9,64	-8,43
1734480	10,63	-8,68	10,85	2,93
1734400	11,05	3,05	10,65	2,42
1734410	7,10	1,88	10,65	2,40
1731400	11,40	2,18	10,31	1,16

Продолжение таблицы 3.3

1733300	11,23	2,65	9,14	2,10
1733600	11,23	2,65	8,76	2,33
1434780	7,12	2,33	9,59	-6,65
1530100	8,25	2,72	6,40	-2,48
1112200	12,35	2,73	12,49	-11,35
1112480	6,92	1,67	12,05	-9,99
1134050	10,20	0,97	10,06	-8,41
1134040	8,00	2,42	10,18	-8,45
1813300	7,17	2,43	12,80	-13,53
1813200	6,90	2,45	12,92	-12,88
1931025	9,70	-7,79	11,07	-4,90
1928745	9,65	-6,37	10,68	-4,84
1928490	10,06	-7,58	10,43	-5,34
1928865	9,85	-6,36	10,43	-4,60
1931180	10,23	-1,28	11,63	-4,29
1931370	5,12	-2,75	12,60	-3,32
1928745	5,17	-1,63	10,68	-4,84
1931370	12,31	-11,23	12,60	-3,32
1234100	13,23	-11,38	14,07	0,44
1234680	12,15	-10,20	12,92	7,35
1234120	11,40	-7,45	13,92	0,80
1234050	13,45	-9,88	14,24	0,17
1234130	11,42	-6,57	13,28	0,05
1234080	12,52	-6,80	14,74	0,47
1337251	13,14	-10,48	10,62	14,19
1337151	11,58	-8,17	7,47	7,70
1337100	11,97	-8,23	7,23	13,92
1338271	11,32	-4,82	5,13	12,26
1338401	10,48	-4,78	6,01	12,73
1338200	11,47	-4,47	5,76	10,43
1348100	10,17	-5,07	3,34	13,29
1339012	10,92	-3,65	4,02	12,86
1336500	9,85	-4,62	5,59	9,65
1337200	10,93	-3,17	6,99	14,74
1339011	12,52	-3,55	4,01	12,86
1348151	12,75	-3,40	4,44	14,01
1338201	12,78	-13,48	6,06	14,08
1339015	13,35	-13,37	3,30	11,51
1340500	14,45	-12,22	2,28	11,99
1339017	13,47	-13,73	3,76	12,21
1348152	14,02	0,75	4,68	14,08
1338600	13,32	7,17	6,95	13,11
1338300	13,85	1,47	5,65	13,36

Продолжение таблицы 3.3

1537180	14,62	0,30	4,55	14,93
1535110	13,73	1,62	9,28	15,50
1196300	14,75	0,60	-24,29	27,53
1160750	10,73	14,60	-29,25	29,91
1160700	7,55	13,95	-29,57	29,62
1160600	7,22	13,57	-32,87	27,05
1196600	4,80	12,00	-26,27	26,32
1159900	5,92	12,67	-27,44	29,52
1197300	5,47	10,55	-25,98	30,32
1160320	3,38	12,77	-33,10	19,96
1160880	3,88	12,52	-28,41	30,42
1160580	5,75	9,32	-32,25	25,71
1159650	7,43	15,44	-30,08	28,01
1159800	3,78	12,25	-27,45	28,99
1495800	4,23	14,32	-18,61	32,48
1491610	3,22	11,92	-18,89	30,72
1495800	5,92	14,13	-18,61	32,48
1491610	2,30	11,30	-18,89	30,72
1495800	3,43	11,28	-18,61	32,48
1491610	4,20	14,68	-18,89	30,72
1495720	6,33	12,82	-18,48	31,92
1491500	3,57	10,12	-18,81	30,54
1495700	4,57	11,37	-18,31	31,74
1491200	2,02	14,90	-19,15	28,23
1269600	8,53	16,07	-2,06	33,94
1286700	-24,16	27,48	-8,20	37,00
1287800	-25,78	27,76	-5,97	35,30
1289200	-33,33	26,08	-5,17	38,47
1289450	-29,07	30,25	-6,69	38,70
1870500	-29,74	29,90	-2,00	30,00
1870600	-31,00	26,35	-2,06	30,11
1870800	-33,19	27,39	-2,38	30,79
1269600	-26,01	29,25	-2,06	33,94
1445050	-27,17	29,23	-4,17	13,30
1286700	-19,07	29,82	-8,20	37,00
1287800	-19,05	29,78	-5,97	35,30
1289200	-19,07	30,35	-5,17	38,47
1289450	-20,37	30,90	-6,70	38,70
1444100	-20,52	29,27	-2,87	11,97
1445050	-18,92	32,42	-4,17	13,30
1445100	-20,58	29,18	-4,10	12,07
1445490	-18,82	30,32	-4,12	13,08
1445500	-18,92	31,95	-4,13	13,07

Продолжение таблицы 3.3

1737150	-18,85	29,82	6,47	17,45
1447100	9,03	-9,00	-4,60	14,93
1737210	10,75	-11,12	7,30	18,28
1749050	10,03	-10,75	3,67	18,30
1749080	10,38	-9,30	4,53	18,47
1448050	10,60	-9,73	2,02	14,90
1468050	10,65	-9,87	0,93	30,00
1653100	11,37	-9,61	-3,33	29,25
1653225	10,63	-8,68	-4,01	29,46
1737150	11,05	3,05	6,47	17,45
1737200	7,10	1,88	6,50	18,27
1737210	11,40	2,18	7,30	18,28
1749050	11,23	2,65	3,67	18,30
1749080	11,23	2,65	4,53	18,47
1749200	7,12	2,33	5,73	19,08
1749600	8,25	2,72	5,03	25,15
1789300	12,35	2,73	-0,45	39,70

Примечание – «-» – западная долгота или южная широта, «+» – восточная долгота или северная широта.

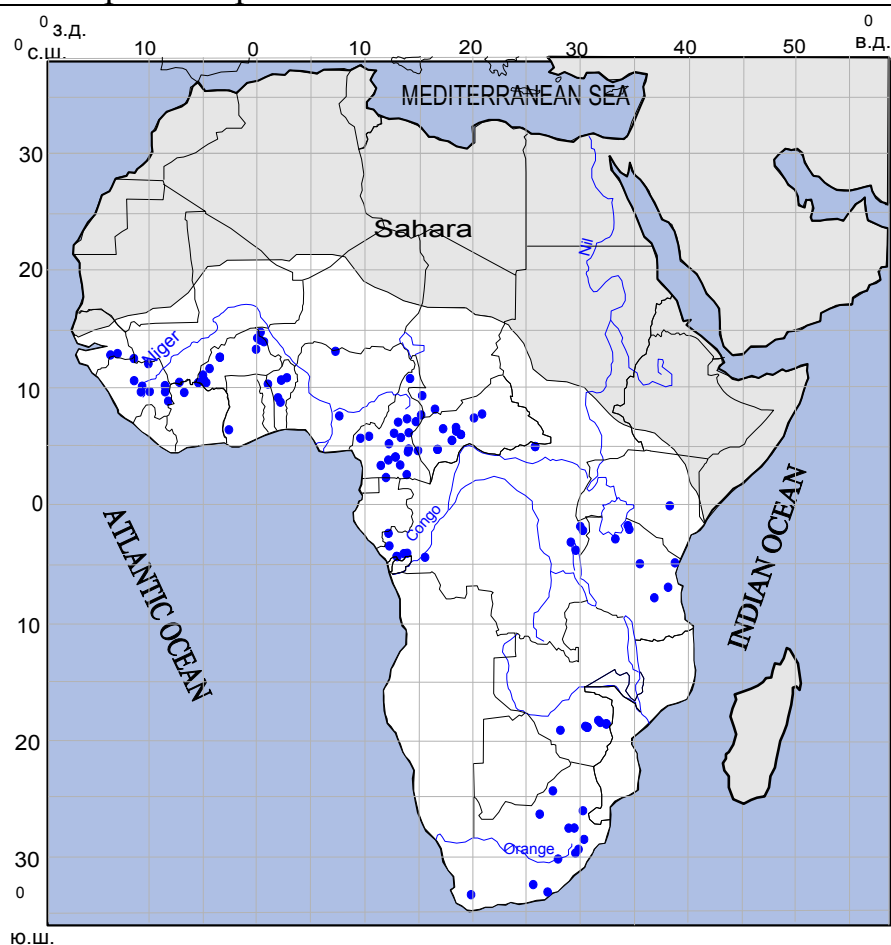


Рисунок 3.3 – Местоположение центров водосборов рек Юго-Западной Африки.

3.2 Статистическая оценка гидрологических характеристик

Статистические характеристики вычислялись по общеизвестным формулам, которые есть практически во всех учебниках по гидрологическим расчетам, включая монографии (см., например, [37, 38]). Исключение составляет сравнительно новая характеристика – критерий устойчивости решений системы дифференциальных уравнений для моментов, аппроксимирующих распределения плотности вероятности, принадлежащие семейству кривых К. Пирсона [24].

Коэффициент стока. Одним из важнейших способов широкого территориального обобщения является карта изолиний коэффициента стока, который рассчитывался по формуле:

$$k = h/X, \quad (3.1)$$

где k – коэффициент стока;

h – среднемноголетний слоя стока, мм/год;

X – осадки, мм/год.

Слой стока (мм):

$$h = (31.5\bar{Q}1000) / F, \quad (3.2)$$

где \bar{Q} ($\text{м}^3/\text{с}$) – средний расход воды;

F – площадь водосбора (км^2).

Модуль стока q ($\text{л}/\text{с км}^2$):

$$q = 1000\bar{Q} / F. \quad (3.3)$$

Коэффициент вариации. Коэффициент вариации и его среднеквадратическое отклонение рассчитывались по следующим формулам:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i / \bar{Q} - 1)^2}{n}}, \quad \sigma_{C_v} = C_v \sqrt{\frac{1 + C_v}{2n}}, \quad (3.4)$$

где Q_i – расход воды за конкретный год;

n – число членов ряда.

Коэффициент асимметрии и его среднеквадратическое отклонение:

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i / \bar{Q} - 1)^3}{nC_v^3}, \quad \sigma_{C_s} = \sqrt{6(1 + 6C_v^2 + 5C_v^4) / n}. \quad (3.5)$$

Коэффициент автокорреляции. Коэффициент автокорреляции $r(\tau)$ характеризует связь ряда величин с этим же рядом, сдвинутым на некоторый интервал времени τ . Коэффициент автокорреляции рассчитывался по следующей формуле:

$$r(1) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (Q_{i+1} - \bar{Q}_1)(Q_i - \bar{Q}_2)}{\sqrt{\sum_{i=2}^n (Q_{i+1} - \bar{Q})^2 \sum_{i=1}^{n-1} (Q_i - \bar{Q}_2)^2}}. \quad (3.6)$$

Критерий устойчивости (β). Ранее в РГГМУ был разработан практический путь нахождения численных значений параметра β [27]. Из уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК) следует выражение для нормированной автокорреляционной функции:

$$r = \exp[-(\bar{c} - 0,5G_{\bar{c}})\tau], \quad (3.7)$$

где \bar{c} – среднее значение величины обратной произведению коэффициента стока на время релаксации речного бассейна;

$G_{\bar{c}}$ – интенсивность шумов величины c .

При годовой сдвигке ($\tau = 1$) уравнение преобразуется к выражению

$$\beta = 2k \ln r + 2. \quad (3.8)$$

Для вычисления β необходимо знание величин k и r . Поля этих гидрометеорологических элементов были закартированы (в различных вариантах: районирование и изолинии). Эти данные были использованы для вычисления параметра β и его картирования.

В таблице 3.4 представлены рассчитанные гидрологические характеристики рядов наблюдений за годовым речным стоком рек Юго-Западной Африки. В этой же таблице представлены относительные погрешности стока и коэффициента вариации.

Таблица 3.4 – Рассчитанные гидрологические характеристики

Река	F , км ²	Длина ряда	h , мм/ δ_h , %	Cv / δ_{Cv} , %	Cs	$r(1)$	k	β
MILO	1000	39	1176/6	0,37/12	1,72	0,00	0,74	–
TINKISSO	1260	44	372/8	0,56/12	1,18	0,35	0,20	1,57
NIGER	3180	44	903/4	0,26/11	0,21	0,04	0,46	–
MILO	9620	47	614/4	0,28/11	–0,87	0,07	0,46	–
NIANDAN	12770	47	532/6	0,15/11	–0,25	0,15	0,28	0,95
NIGER	18000	44	446/6	0,42/12	1,07	0,40	0,25	1,54
SANKARANI	21900	41	414/7	0,30/12	1,12	–0,04	0,24	–
IRANE	1250	43	115/12	0,76/14	1,17	0,55	0,11	1,86
ALIBORI	8170	42	149/10	0,63/13	1,24	0,42	0,14	1,75
ALIBORI	8170	43	102/8	0,50/72	0,17	0,47	0,10	1,85

Продолжение таблицы 3.4

Река	F , км ²	Длина ряда	h , мм/ δ_h , %	Cv / δ_{Cv} , %	Cs	$r(1)$	k	β
PENDJARI	22280	41	86/14	0,91/14	2,88	-0,18	0,08	-
OUEME	23600	43	148/11	0,69/13	0,58	0,15	0,13	1,53
OUEME	46990	43	130/11	0,75/14	1,60	0,04	0,12	1,23
BAGOE	2580	39	559/6	0,38/12	1,14	-0,31	0,41	-
TANO	15800	38	288/3	0,16/12	0,17	-0,14	0,20	-
FALEME	15000	40	263/9	0,57/13	0,49	0,68	0,22	1,83
BAFING	15500	39	485/6	0,37/6	0,13	0,35	0,39	1,16
SANKARANI	34200	63	335/4	0,34/4	0,07	0,63	0,21	1,81
SANKARANI	35300	39	289/10	0,63/10	1,21	0,20	0,18	1,41
KOULOUNTOU	5350	44	206/5	0,33/5	-0,27	0,48	0,16	1,77
GAMBIA	42000	44	164/7	0,47/7	0,07	0,68	0,13	1,89
BLACK VOLTA	2816	39	127/6	0,40/6	-0,01	0,38	0,11	1,79
COMOE	2350	39	135/9	0,59/9	0,56	0,48	0,11	1,84
LERABA	5930	39	176/9	0,59/9	0,65	0,44	0,14	1,77
COMOE	9480	39	82/7	0,41/6	-0,19	0,50	0,07	1,90
BLACK VOLTA	14800	40	57/9	0,55/8	0,33	0,75	0,06	1,97
BLACK VOLTA	37140	41	176/7	0,47/12	0,04	0,72	0,04	1,98
COMOE	2350	39	135/9	0,59/13	0,56	0,48	0,11	1,84
BLACK VOLTA	37140	41	29/7	0,47/12	0,04	0,72	0,04	1,98
DARGOL	2750	39	31/9	0,58/13	0,14	0,08	0,06	1,79
MARADI	5400	39	41/15	0,63/13	1,10	0,33	0,01	1,98
DARGOL	6940	39	37/8	0,54/13	0,25	0,18	0,06	1,80
GAROUOL	7500	39	31/25	0,53/13	1,21	0,05	0,05	1,69
SIRBA	38750	39	20/10	0,63/13	-0,14	0,21	0,03	1,90
GOROUOL	44900	39	6/11	0,69/14	2,33	0,33	0,01	1,97
TSANAGA	1535	30	188/12	0,66/16	2,48	0,43	0,23	1,61
BINI	1585	30	513/2	0,13/13	-0,47	0,31	0,33	1,22

Продолжение таблицы 3.4

Река	F , км ²	Длина ряда	h , мм/ δ_h , %	Cv / δ_{Cv} , %	Cs	$r(1)$	k	β
VINA	1690	30	668/3	0,21/13	-1,21	-0,20	0,44	-
NDJEKE	3720	30	353/4	0,24/13	-0,90	0,55	0,21	1,74
MAPE	4020	30	752/3	0,16/13	-0,45	0,01	0,47	-
NOUN	4700	38	698/3	0,17/12	0,14	0,17	0,33	0,84
DJA	5150	30	373/5	0,29/13	-0,82	0,53	0,24	1,70
NYONG	5300	30	324/5	0,25/13	-1,11	0,52	0,21	1,73
CROSS	6810	30	273/4	0,23/13	-0,51	0,31	1,12	-
MBERE	7430	30	467/4	0,22/13	0,70	0,29	0,32	1,23
NYONG	8350	30	333/4	0,21/13	-1,12	0,45	0,21	1,66
KADEI	8970	30	422/2	0,11/13	0,43	0,36	0,28	1,43
LOM	11100	30	506/2	0,13/13	0,74	0,33	0,33	1,27
NYONG	19985	30	393/4	0,22/13	-0,90	0,26	0,22	1,40
NTEM	18100	30	468/4	0,22/13	0,16	0,46	0,28	1,55
NYONG	18510	30	435/6	0,31/14	-0,07	0,61	0,27	1,73
KADEI	20370	30	362/7	0,14/13	0,34	0,05	0,24	0,58
DJEREM	20390	30	620/3	0,18/13	-0,04	0,23	0,39	0,85
MBAM	42300	30	520/4	0,21/13	-1,05	0,30	0,34	1,18
LOGONE	33970	59	497/6	0,43/10	0,44	0,63	0,33	1,69
KABIA	2072	13	18/23	0,84/26	2,34	-0,20	0,02	-
MATLABAS	1054	80	34/9	0,79/10	1,81	0,07	0,06	1,67
MOOIRIVIER	1546	49	182/7	0,49/11	1,26	0,32	0,21	1,53
MKOMAZI	1744	52	387/6	0,44/11	1,13	0,18	0,51	0,25
KEISKAMMA	2530	52	40/9	0,62/12	1,37	-0,08	0,07	-
OLIFANTS	3256	80	51/8	0,72/10	2,032	0,21	0,09	1,73
KLIP	4152	96	48/10	0,95/10	2,99	0,44	0,07	1,89
INCOMATI	5540	80	77/6	0,51/12	0,90	0,14	0,12	1,50
DORING	6895	79	39/7	0,61/13	0,90	0,10	0,13	1,38

Продолжение таблицы 3.4

Река	F , км ²	Длина ряда	h , мм/ δ_h , %	Cv / δ_{Cv} , %	Cs	$r(1)$	k	β
TUGELA	28920	55	105/6	0,48/11	0,49	0,21	0,13	1,60
GROOT-VIS	29745	52	10/7	0,50/11	0,62	0,00	0,02	–
ORANGE	37070	87	118/6	0,56/9	1,35	0,09	0,16	1,24
VAAL	38564	84	36/9	0,80/10	1,95	0,25	0,05	1,86
ODZI	2498	39	132/7	0,46/13	0,29	0,24	0,13	1,63
MUNYATI	2662	41	80/13	0,87/15	0,95	0,38	0,09	1,83
ODZI	2498	39	132/7	0,46/13	0,29	0,24	0,13	1,63
MUNYATI	2662	41	80/14	0,87/15	0,95	0,38	0,09	1,83
ODZI	2498	39	132/7	0,46/13	0,29	0,24	0,13	1,63
MUNYATI	2662	41	80/13	0,87/15	0,95	0,38	0,09	1,83
MACHEKE	3383	39	132/10	0,64/14	0,49	0,06	0,15	1,14
UMNIATI	5890	41	58/13	0,85/15	1,37	0,19	0,07	1,78
SAVE	11174	39	116/11	0,72/14	0,75	–0,07	0,14	–
GWAAI	38600	80	17/9	0,80/10	3,10	0,18	0,03	1,91
GURUMETI	13233	10	27/24	0,77/28	1,10	0,23	0,04	1,90
KILOMBERO	33400	42	340/7	0,46/12	0,52	0,44	0,38	1,37
BUBU	11400	25	14/12	0,64/17	1,57	0,00	0,03	1,65
PANGANI	25110	19	33/5	0,25/17	0,56	0,31	0,05	1,89
RUVU	15916	25	122/9	0,45/16	1,39	0,25	0,09	1,74
NYABARONGO	8900	20	307/3	0,14/16	–0,35	0,04	0,33	–
NYABARONGO	14600	20	131/10	0,12/16	0,42	0,01	0,24	–
KAGERA	30200	20	233/3	0,15/16	1,05	0,31	0,25	1,43
GURUMETI	13233	10	27/24	0,77/28	1,10	0,23	0,04	1,90
NIARI	17190	15	578/3	0,13/18	–0,61	–0,25	0,44	–
KILOMBERO	33400	42	340/7	0,46/12	0,52	0,44	0,38	1,37
BUBU	11400	25	14/13	0,64/17	1,57	0,00	0,03	1,65
PANGANI	25110	19	33/6	0,25/17	0,56	0,31	0,05	1,89

Продолжение таблицы 3.4

Река	F , км ²	Длина ряда	h , мм/ δ_h , %	C_v / δ_{C_v} , %	C_s	$r(1)$	k	β
RUVU	15916	25	122/9	0,45/16	1,39	0,25	0,09	1,74
NYANGA	5800	11	1077/6	0,19/22	-0,48	0,01	0,61	-
NIARI	17190	15	578/3	0,13/18	-0,61	-0,25	0,44	-
KOUILOU	55010	15	487/4	0,17/19	-0,11	-0,37	0,32	-
NIARI	23385	15	511/3	0,13/18	-0,53	-0,28	0,39	-
LOUDIMA	3990	11	225/5	0,17/22	-1,06	-0,56	0,17	-
OUHAM	22800	23	399/11	0,51/17	1,10	0,65	0,29	1,75
FOULAKARY	2980	11	524/6	0,21/22	-0,18	-0,11	0,34	-
OUHAM	44700	23	235/6	0,29/15	-0,63	-0,04	0,17	-
LOBAYE	31000	26	353/2	0,12/14	0,45	-0,05	0,23	-
MPOKO	10800	24	315/7	0,35/15	0,71	0,26	0,21	1,42
DJA	38600	25	343/5	0,25/15	-0,01	-0,07	0,22	-
SEMLIKI	8000	23	580/7	0,35/16	2,05	0,60	0,58	1,41
RUSIZI	14300	16	430/7	0,30/19	0,79	0,71	0,35	1,76
MUREMBWE	949,6	17	582/6	0,26/18	-0,05	0,47	0,46	1,30
OUHAM	22800	23	399/11	0,51/17	1,10	0,65	0,29	1,75
FAFA	6750	23	204/7	0,34/16	-0,20	0,77	0,15	1,92
OUHAM	44700	23	235/6	0,29/15	-0,63	-0,04	0,17	-
LOBAYE	31000	26	353/2	0,12/14	0,45	-0,05	0,23	-
MPOKO	10800	24	315/7	0,35/15	0,71	0,26	0,21	1,42
TOMI	2380	24	222/8	0,41/16	0,02	0,24	0,16	1,55
MBOMOU	29300	28	226/6	0,33/14	0,05	0,11	0,14	1,37
TANA	42220	42	116/7	0,48/12	1,20	0,28	0,18	1,54

Из таблицы 3.4 видно, что средняя погрешность определения нормы слоя стока составляет 7,5 %, а коэффициента вариации – 13%. Значение погрешности для коэффициента вариации зависит от самой величины и от про-

должительности наблюдений. Продолжительность наблюдений в среднем составляет 40 лет.

3.3 Картирование гидрометеорологических характеристик

Картирование производилось при помощи компьютерных приложений *ArcView* и *Surfer*. Из приложения *ArcView* был взят Африканский континент с водными объектами в прямоугольной проекции. С помощью инструмента *Digitize* в *Surfer* производилась привязка географических координат к прямоугольным, в которых в дальнейшем строились карты. Приложение *Surfer* было выбрано из соображений больших возможностей при пространственной интерполяции данных (построении изолиний) [39].

Осадки. Из рисунка 3.4 видно, что в центральной Африке (бассейн р. Конго) находится область, в которой норма слоя осадков превышает 2000 мм/год, по периферии бассейна р. Конго норма снижается до 1000 мм/год. К северу, югу и востоку от экваториальной зоны слой осадков уменьшается и достигает минимальных величин в самых засушливых пустынных районах Африки. Уменьшение происходит от 2300 мм/год (экватор) до изолиет 200 мм/год в южных широтах и до еще меньших значений в регионе Сахары. В восточной части количество осадков уменьшается от 2300 мм (нулевой меридиан) до меньшего значения, чем 800 мм/год. Наблюдается три засушливых региона с наименьшим количеством осадков: северный, южный и западный. Так же наблюдаются регионы с высоким слоем осадков – это район тропиков, бассейн Конго и нижнее течение реки Нигер.

Температура. В формировании годового стока Африканского континента наряду с осадками важную роль играет среднегодовая температура.

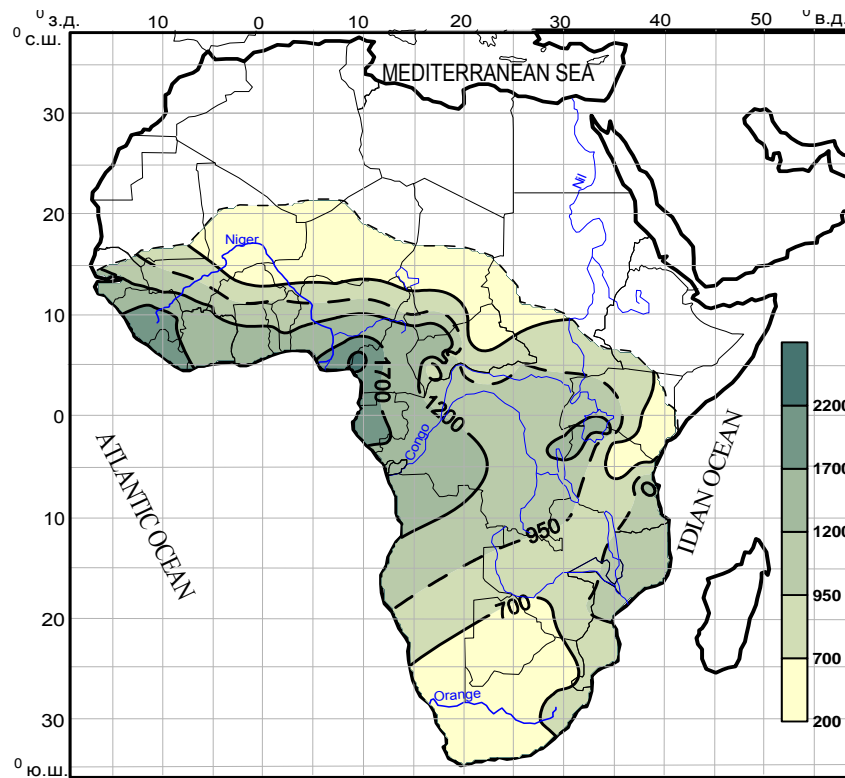


Рисунок 3.4 – Распределение нормы осадков (мм/год).

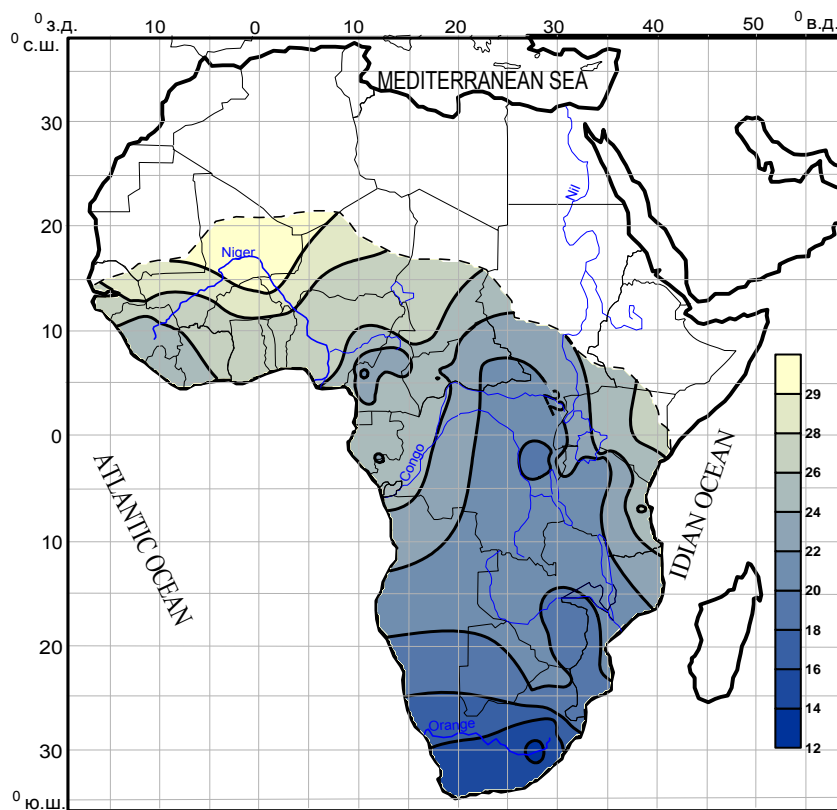


Рисунок 3.5 – Многолетние нормы среднегодовой приземной температуры воздуха (°C).

Температура в Африке более высокая, чем в других регионах земного шара. На рисунке 3.5 видно, что от экватора к югу температура уменьшается от 25 до 19 °С и увеличивается к северу, достигая величин более чем 28 °С.

Речной сток (рисунок 3.6). Максимальная норма годового слоя стока в Африке (1000–1500 мм/год) наблюдается в ее самых дождливых районах на побережье Гвинейского залива, где также велико и значение коэффициента стока (более 0,6–0,7). К северу и востоку слой стока уменьшается; в бассейне р. Конго он составляет около 1000 мм/год, а к периферии бассейна снижается до 200–250 мм/год. В субэкваториальных зонах слой стока уменьшается до 6–25 мм/год. В бассейне Нигер слой стока приближается к нулевым значениям (на границе с полупустынными областями и пустынями). В Сахаре и пустыне Намибии средний многолетний слой стока составляет менее 1 мм/год.

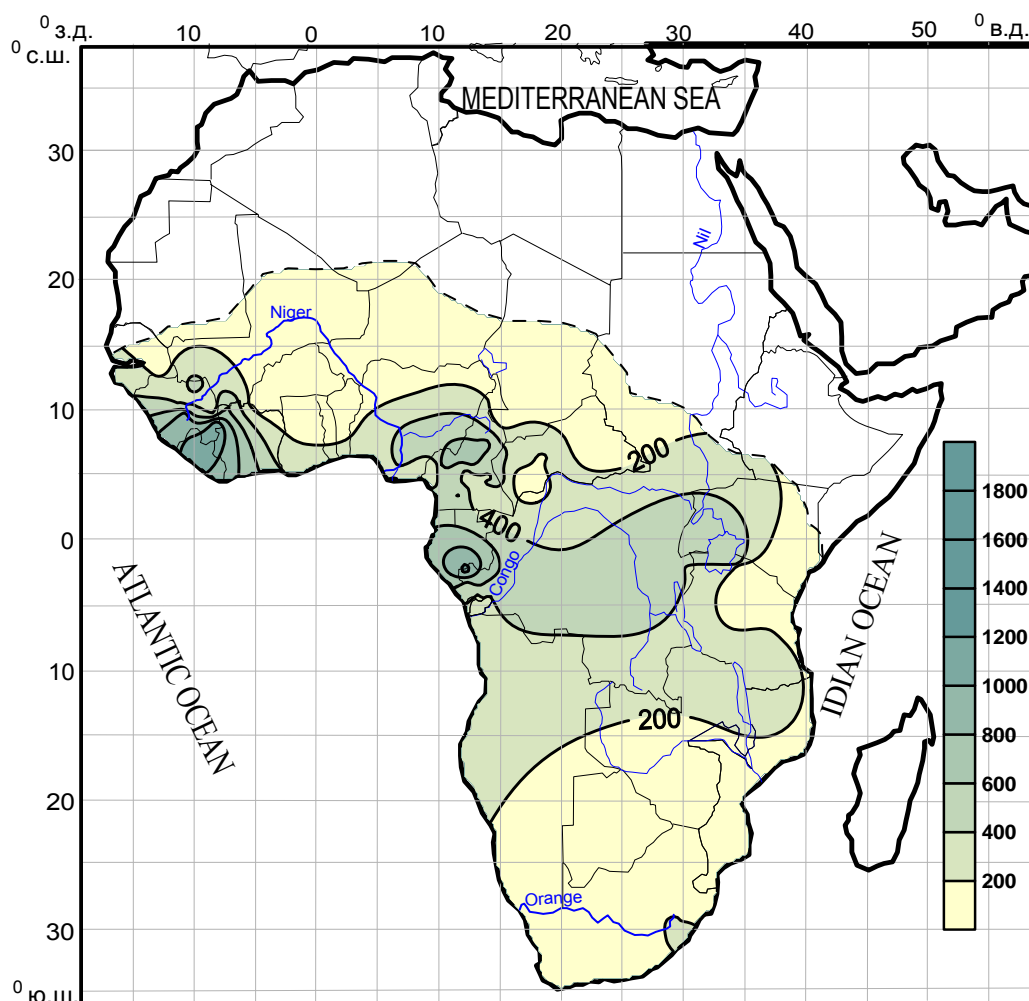


Рисунок 3.6 – Распределение многолетней нормы годового слоя стока (мм/год).

Коэффициент стока (рисунок 3.7). Во многих публикациях коэффициент стока варьируется в широком диапазоне. В работе [35] среднее значение коэффициента стока для Западной Африки равен 0,16. В работе [32] показано, что среднему модулю стока $4,8 \text{ л/с км}^2$ соответствует коэффициент стока 0,35. В работе [40] показано, что для Африки в целом характерен низкий коэффициент стока, составляющий 0,2, тогда как его среднее глобальное значение равняется 0,35. Это связано, прежде всего, с очень высокими величинами суммарного испарения на континенте. Сток многих рек нерегулярен, с большими межгодовыми и сезонными колебаниями. Так, сток крупной западноафриканской реки Нигер в столице Республики Нигер Ниамее в период засух резко падает: в 1974 г. он составлял всего 1, в 1984 – $3 \text{ м}^3/\text{с}$, а в 1985 г. упал до нуля.

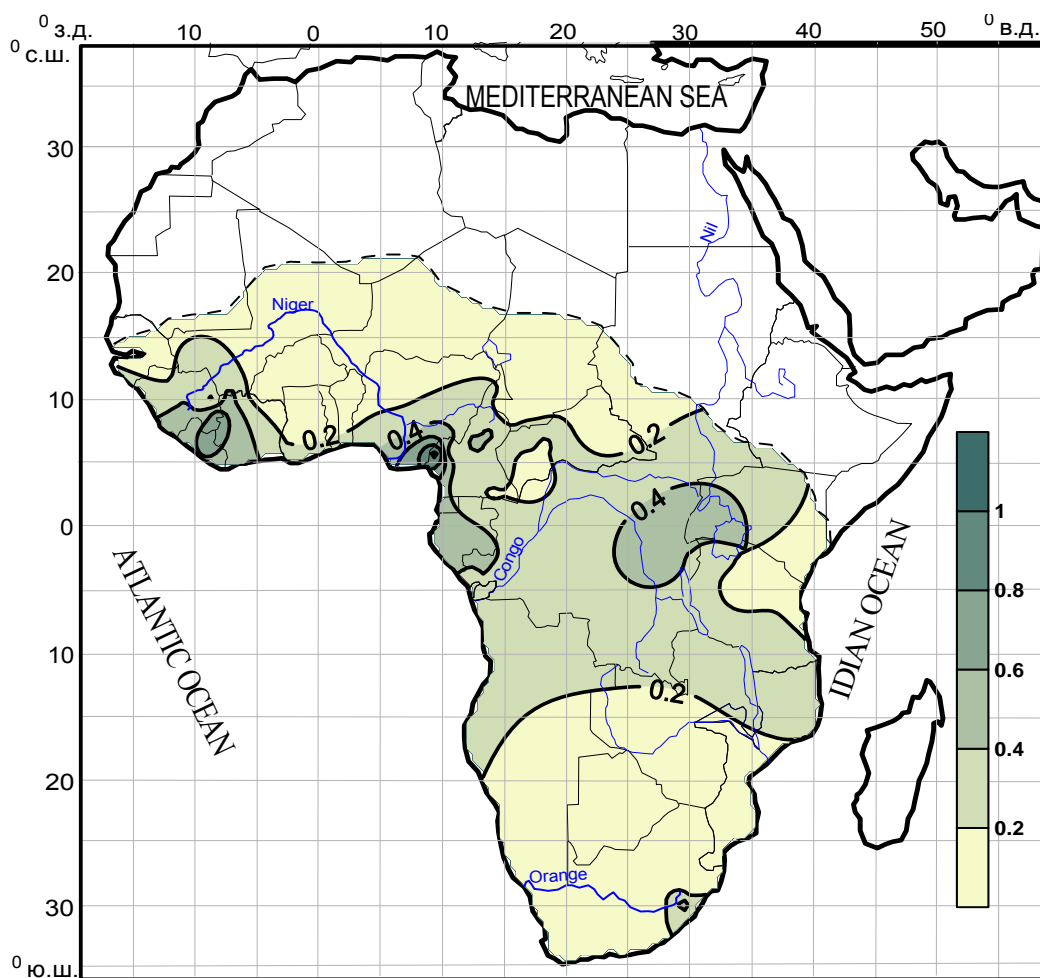


Рисунок 3.7 – Карта распределения коэффициента стока.

Модуль стока (рисунок 3.8). Максимальный модуль годового стока (более 25 л/с км²) наблюдается в побережье Гвинейского залива. К северу и востоку модуль стока уменьшается. В бассейне р. Конго он составляет около 25 л/с км², а к периферии рассматриваемой территории снижается до 5 л/с км². В субэкваториальных зонах (в северной и Южной Африке) модуль стока уменьшается до 0,5 л/с км².

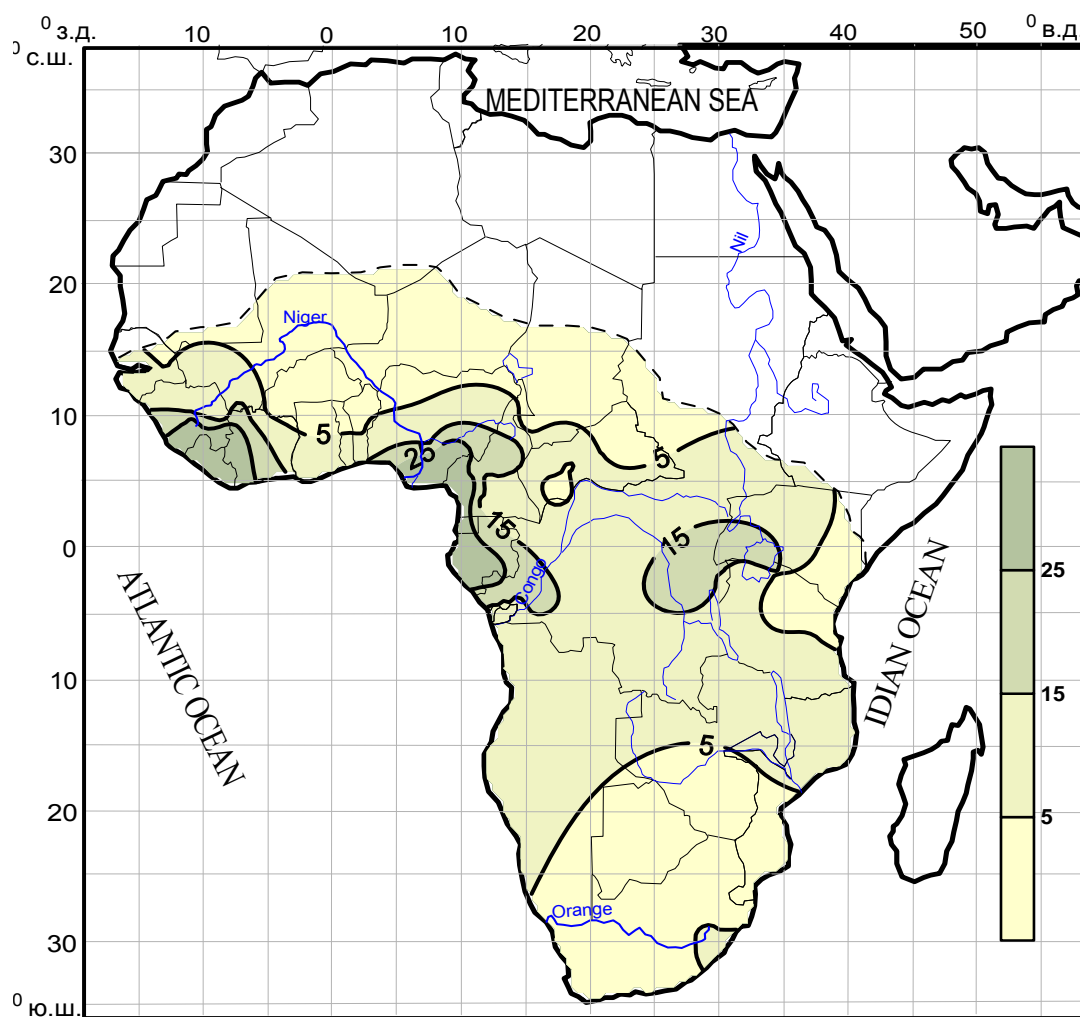


Рисунок 3.8 – Распределение многолетней нормы модуля годового стока.

Коэффициент вариации. На рисунке 3.9 видно, что в засушливых областях коэффициент вариации годового стока очень большой и составляет 0,7 и более, а в районах с большим увлажнением он уменьшается. Например, в бассейне р. Конго, межгодовые колебания стока малы и коэффициент ва-

риации уменьшается до 0,10. В западной Африке и в районе Гвинейского залива он составляет около 0,2. Колебания годового стока рек водосборов Атлантического и Индийского океанов в целом синхронны. В Африке встречается наименьший среди континентов Земли коэффициент вариации стока – 0,04.

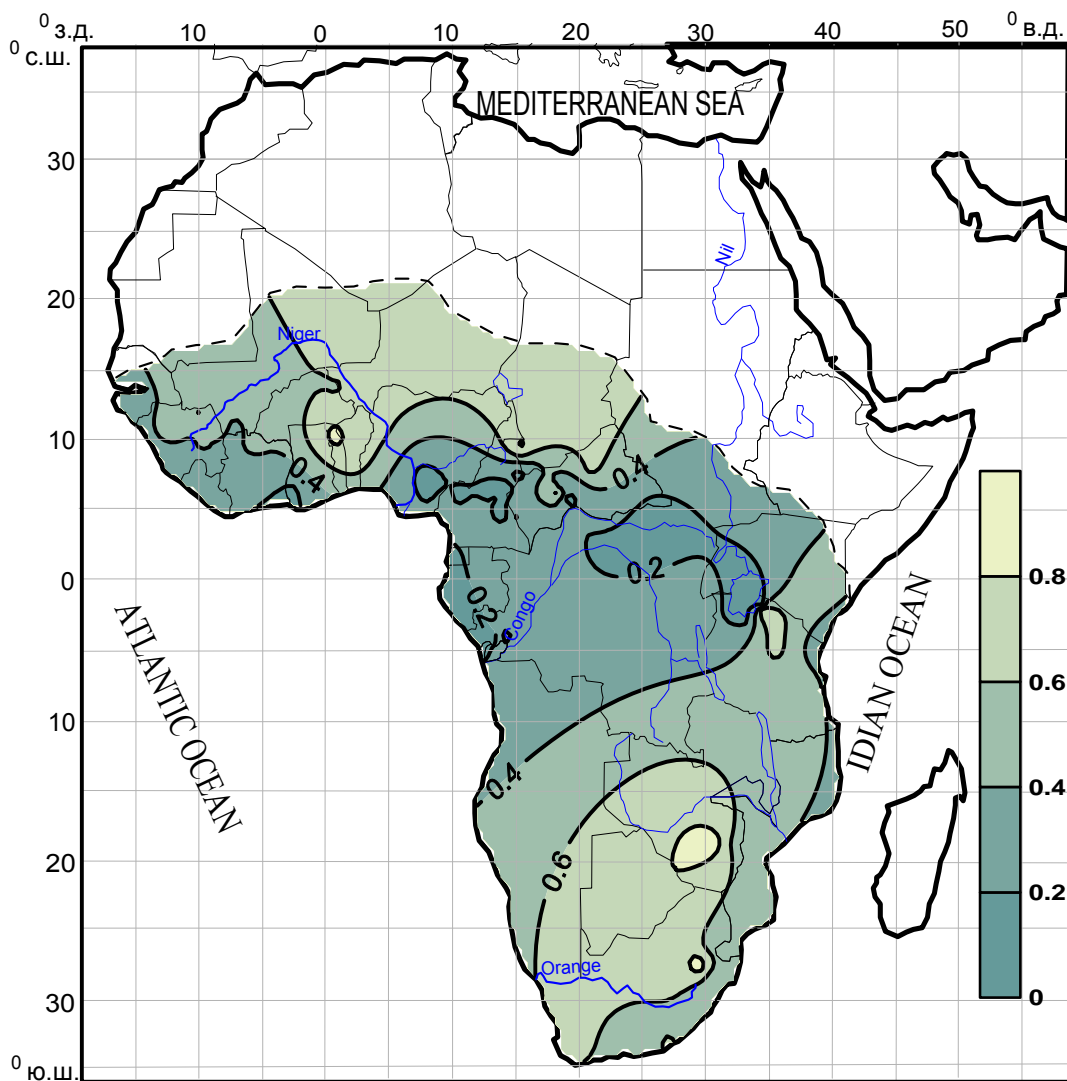


Рисунок 3.9 – Карта распределения коэффициента вариации.

Коэффициент асимметрии. На рисунке 3.10 видно, что в засушливых областях коэффициент асимметрии годового стока большой и составляет более 0,8, а в районах с большим увлажнением он уменьшается. Например, в бассейне Конго коэффициент асимметрии уменьшается до $-0,10$.

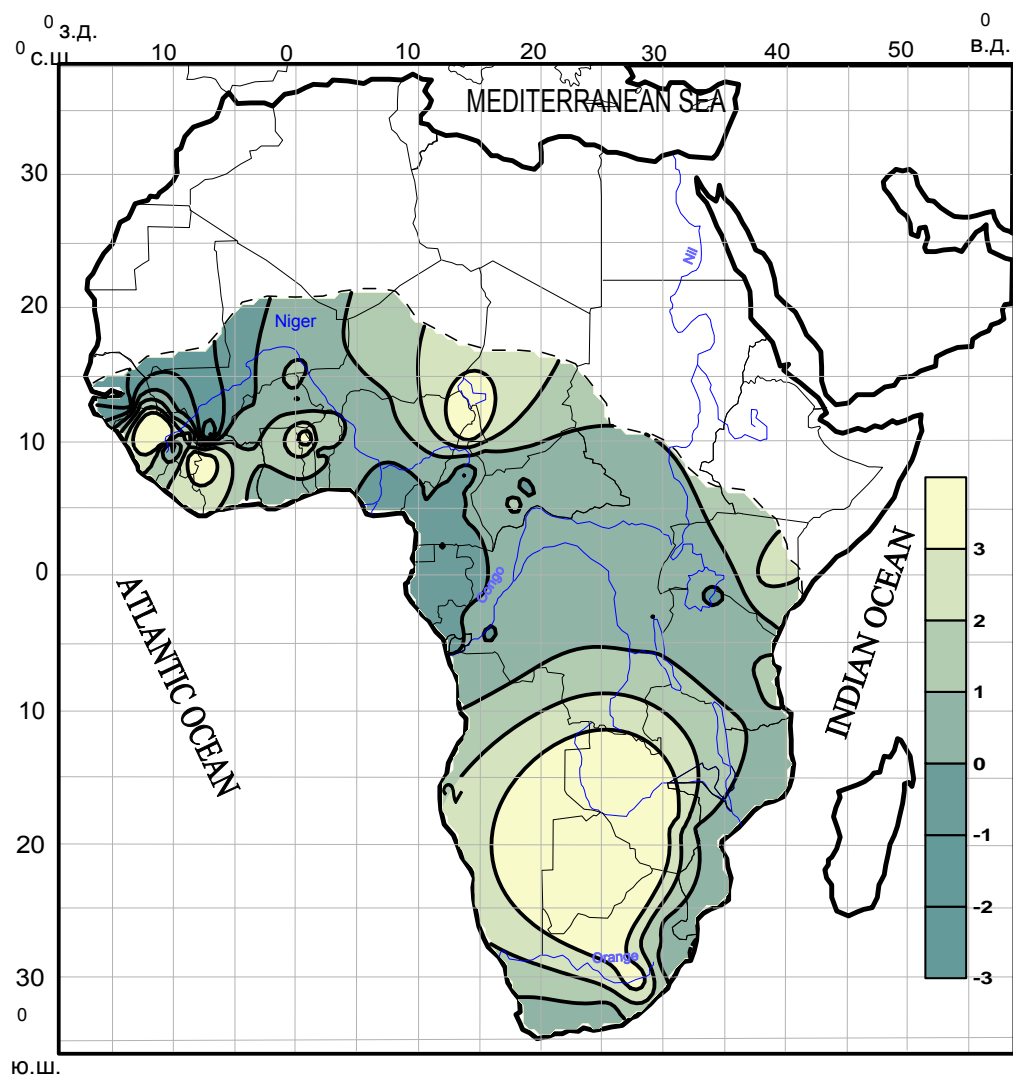


Рисунок 3.10 – Карта распределения коэффициента асимметрии.

Данные об оценке *коэффициентов автокорреляции* необходимы при оценке точности гидрологических расчетов при строительном проектировании, при расчетах регулирования стока, так как коэффициент автокорреляции отражает группировки многоводных и маловодных лет. Коэффициент автокорреляции необходим для расчета критерия β . На рисунке 3.11 представлена карта его распределения.

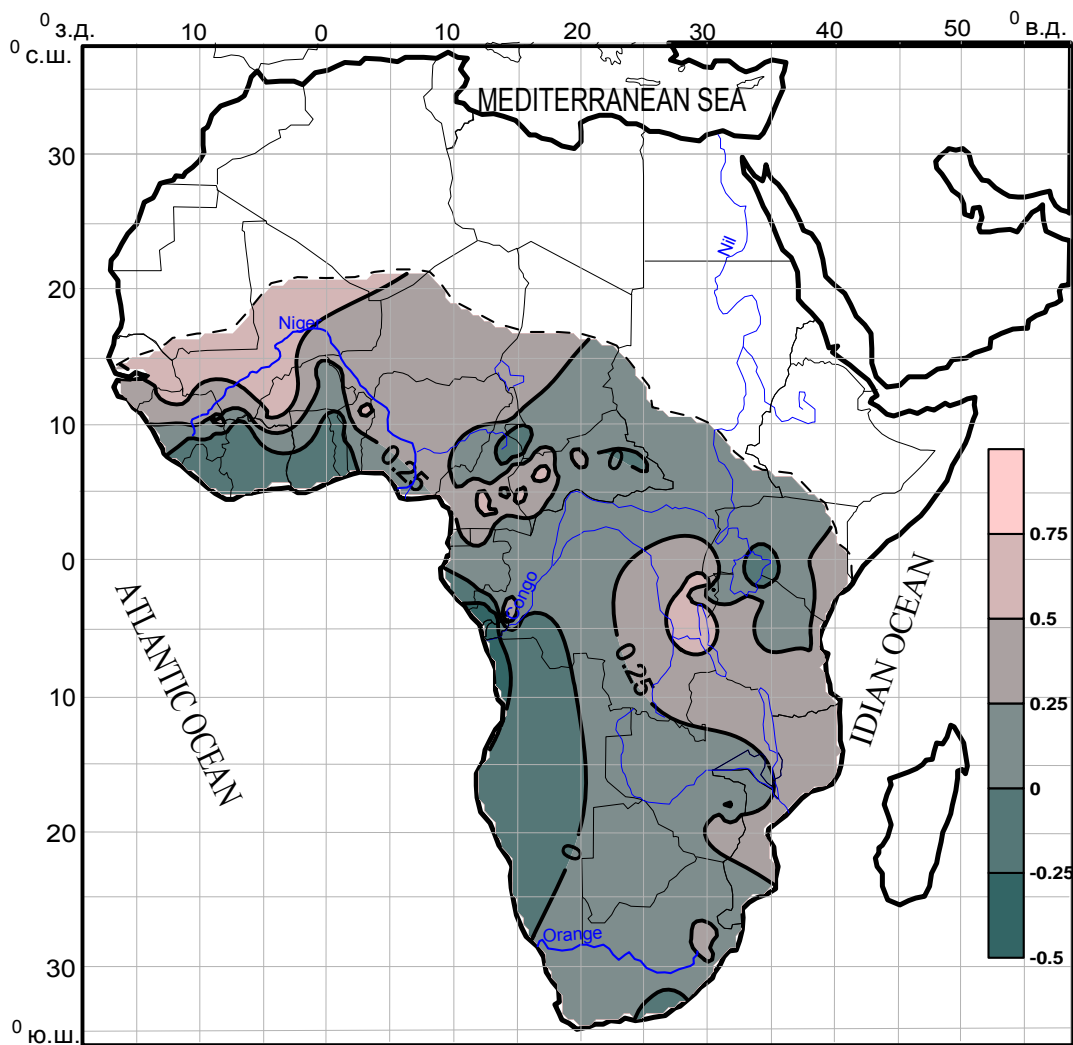


Рисунок 3.11 – Карта распределения коэффициента автокорреляции.

Критерий устойчивости β . При $\beta > 0,67$ происходит потеря устойчивости третьего момента, при $\beta > 1$ – второго. Отсутствие устойчивости по начальным моментам говорит о том, что ряды расходов не представляют собой устойчивой статистической совокупности в классе распределений К. Пирсона [24]. На рисунке 3.12 показано распределение критерия устойчивости для Юго-Западной Африки. Почти вся рассматриваемая территория не устойчива по третьему моменту. Значение критерия увеличивается к северу в сторону Сахары, меньшие значения сосредоточены в бассейнах рек Конго и верхнего течения Нила.

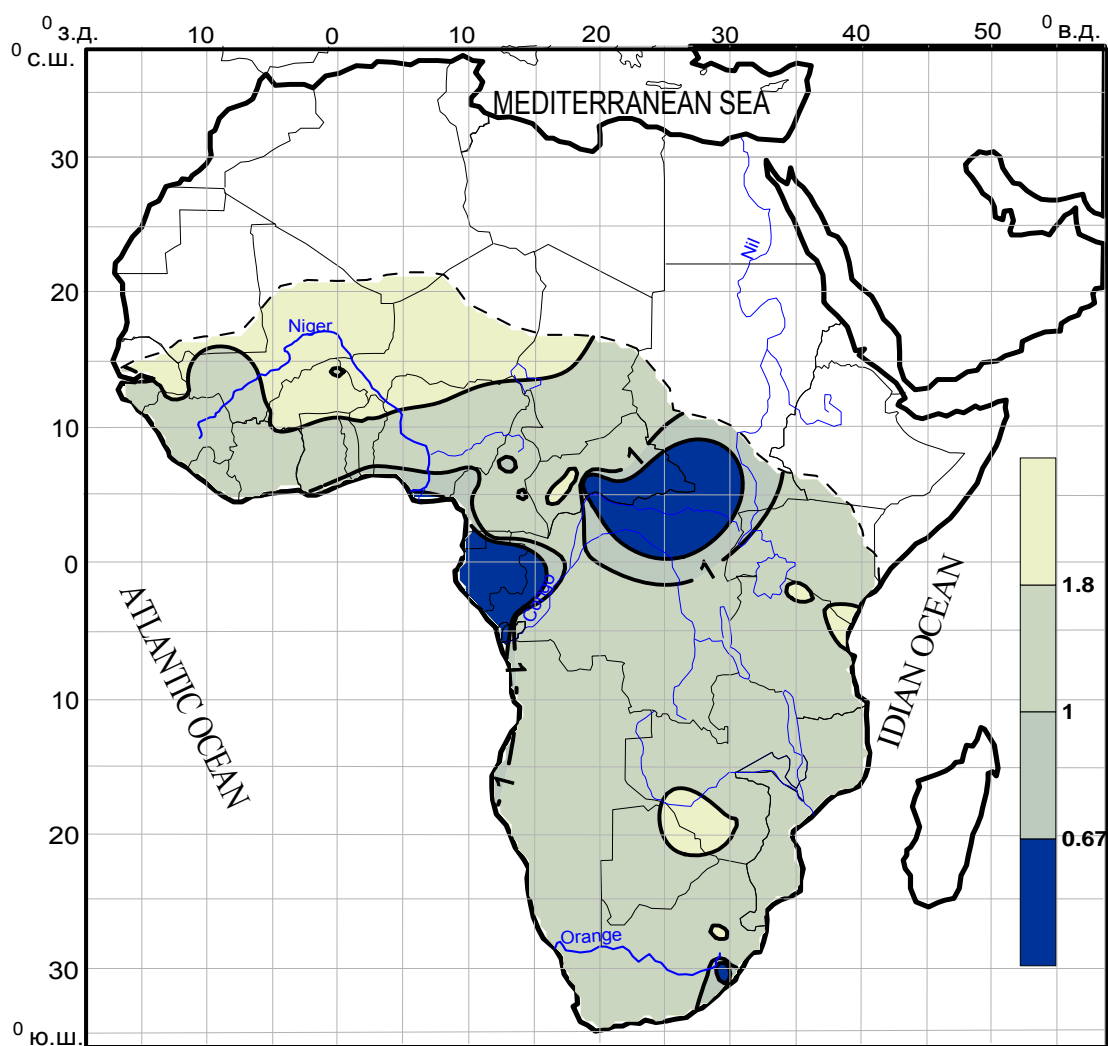


Рисунок 3.12 – Карта распределения критерия устойчивости.

Проведена оценка гидрологических характеристик годового стока рек Юго-Западной Африки, результаты которой представлены в виде географических карт. Полученные результаты необходимы для решения задач, связанных с оценкой гидрологических последствий изменения климата.

3.4 Сценарные метеорологические характеристики

Прогнозные значения метеорологических характеристик были получены со страниц сайта [41], на котором существует возможность выбора сценария, модели, метеорологической величины и прогнозного периода.

Были выбраны четыре климатических сценария: три «политических» сценария – SRAB1, SRA2, SRB1 и один «неполитический» сценарий – Commit. В качестве прогнозной модели использовалась HadCM3. Нормы осадков и температуры воздуха брались на период с 2040 по 2069 гг., значения метеорологических характеристик относятся к узлам географической сетки с шагом 2.5 градуса по широте и долоте.

На рисунках 3.13 – 3.20 показано пространственное распределение сценарных значений метеохарактеристик для Юго-Западной Африки.

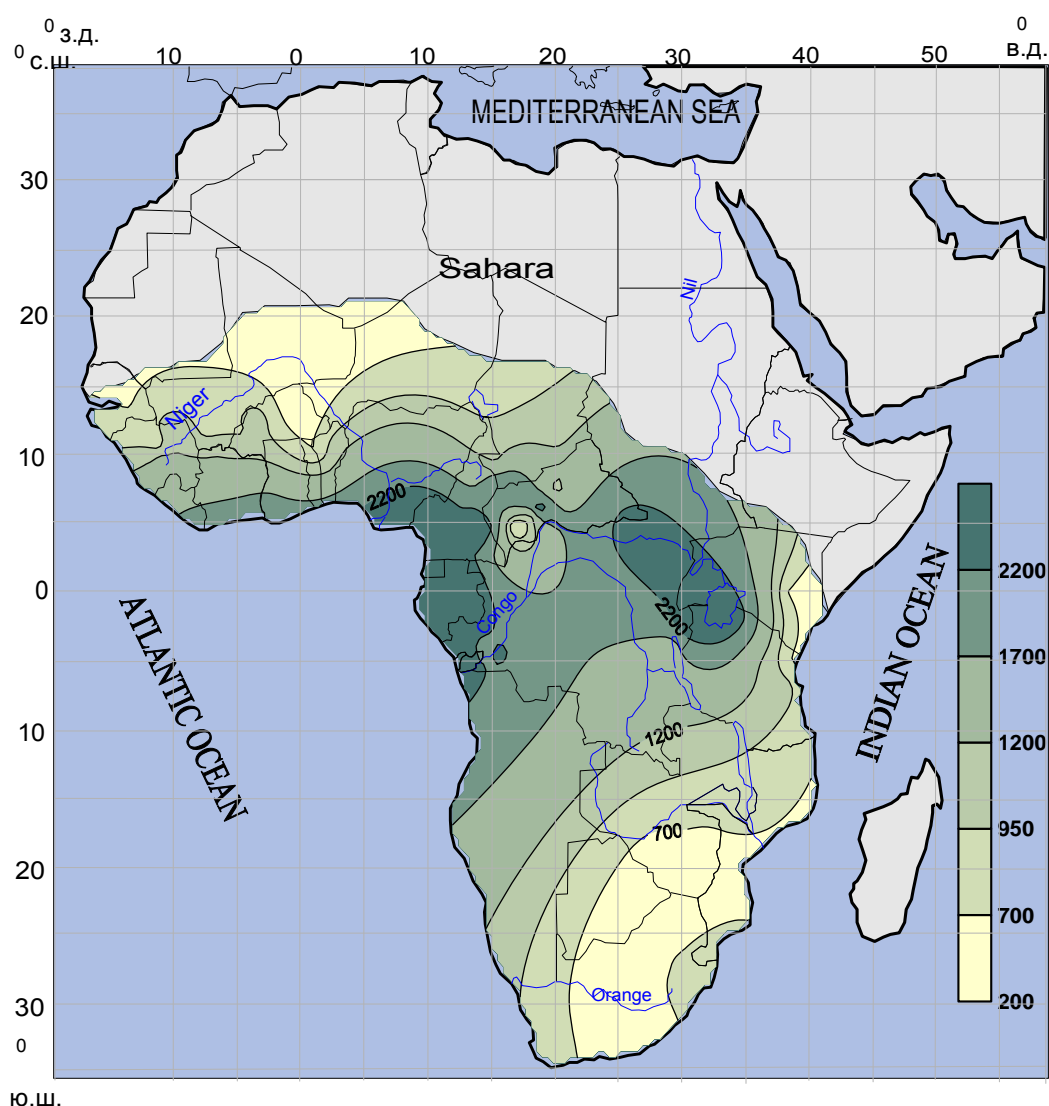


Рисунок 3.13 – Прогнозные значения нормы осадков по сценарию Commit на период от 2040 по 2069 гг.

По сценарию Commit в среднем для Юго-Западной Африки ожидается увеличение нормы осадков на 18 %. Больше станет осадков в бассейне р. Конго примерно на 42 %. В Западной Африке произойдет перераспределение осадков по территории, в среднем приводящее к уменьшению нормы осадков примерно на 24 %, в основном уменьшится норма осадков на западном побережье.

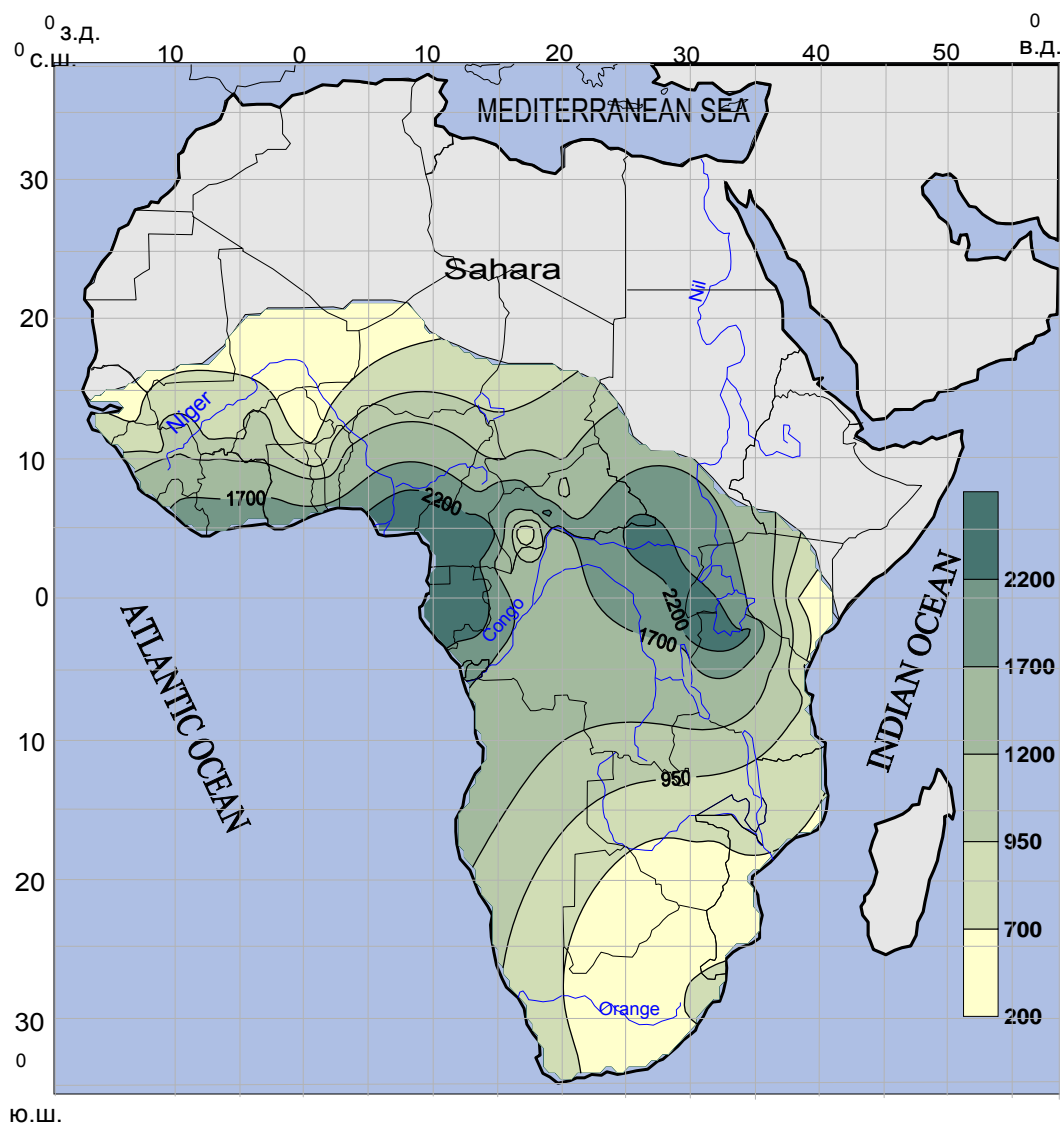


Рисунок 3.14 – Прогнозные значения нормы осадков по сценарию SRAB1 на период от 2040 по 2069 гг.

По сценарию SRAB1 распределение прогнозных норм осадков незначительно отличается от такового по сценарию Commit. Наибольшие различия наблюдаются для бассейна реки Конго: сокращается площадь с максималь-

ными прогнозными значениями нормы осадков, но по сравнению с современными нормами прогнозные значения увеличатся примерно на 25 %.

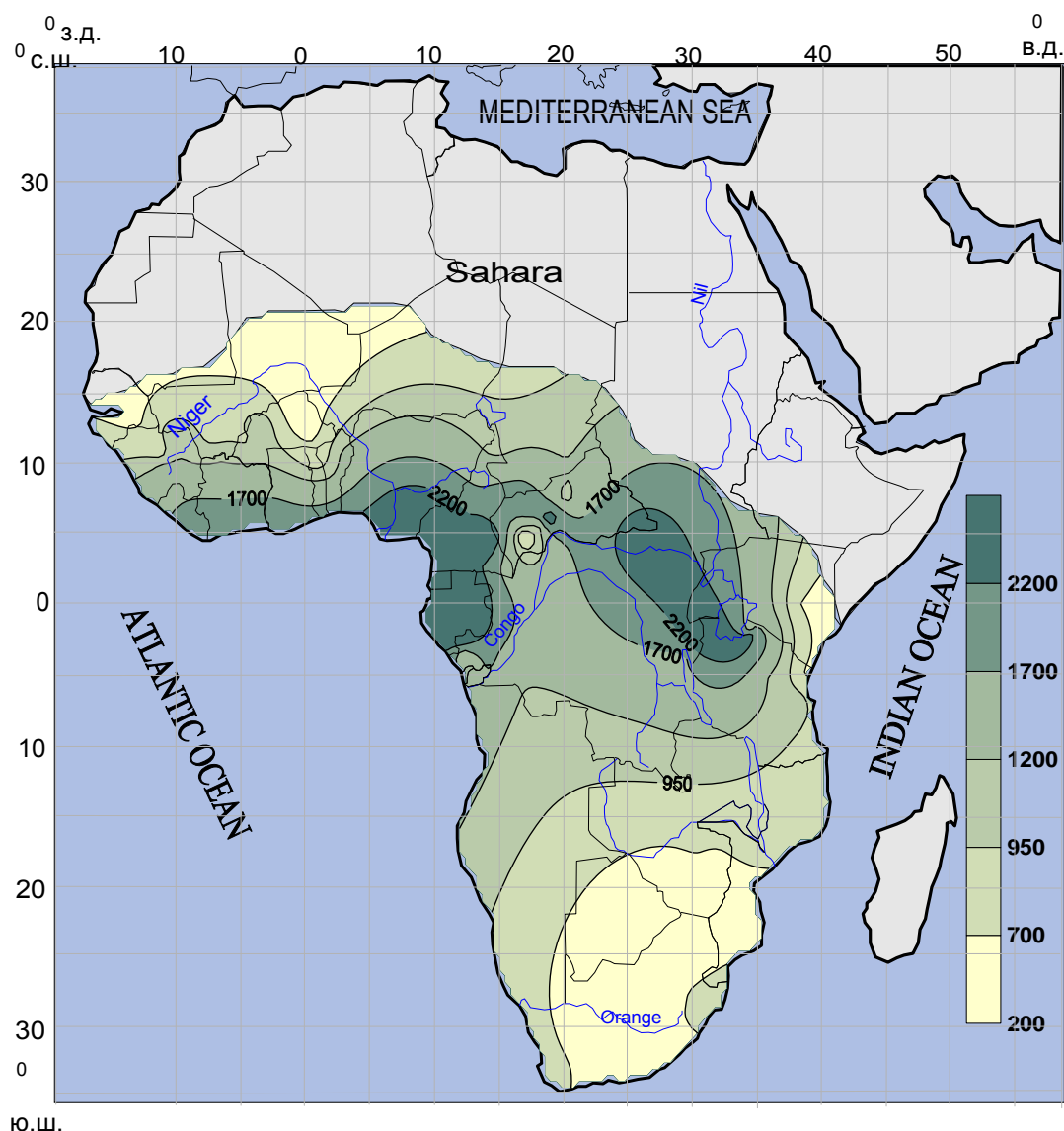


Рисунок 3.15 – Прогнозные значения нормы осадков по сценарию SRA2 на период от 2040 по 2069 гг.

Прогнозные значения по сценарию SRA2 близки к прогнозным значениям сценария SRAB1. Это подразумевает описание этих сценариев, по которому до середины 21 века тенденции в развитии экономики и росте численности населения у них мало отличаются.

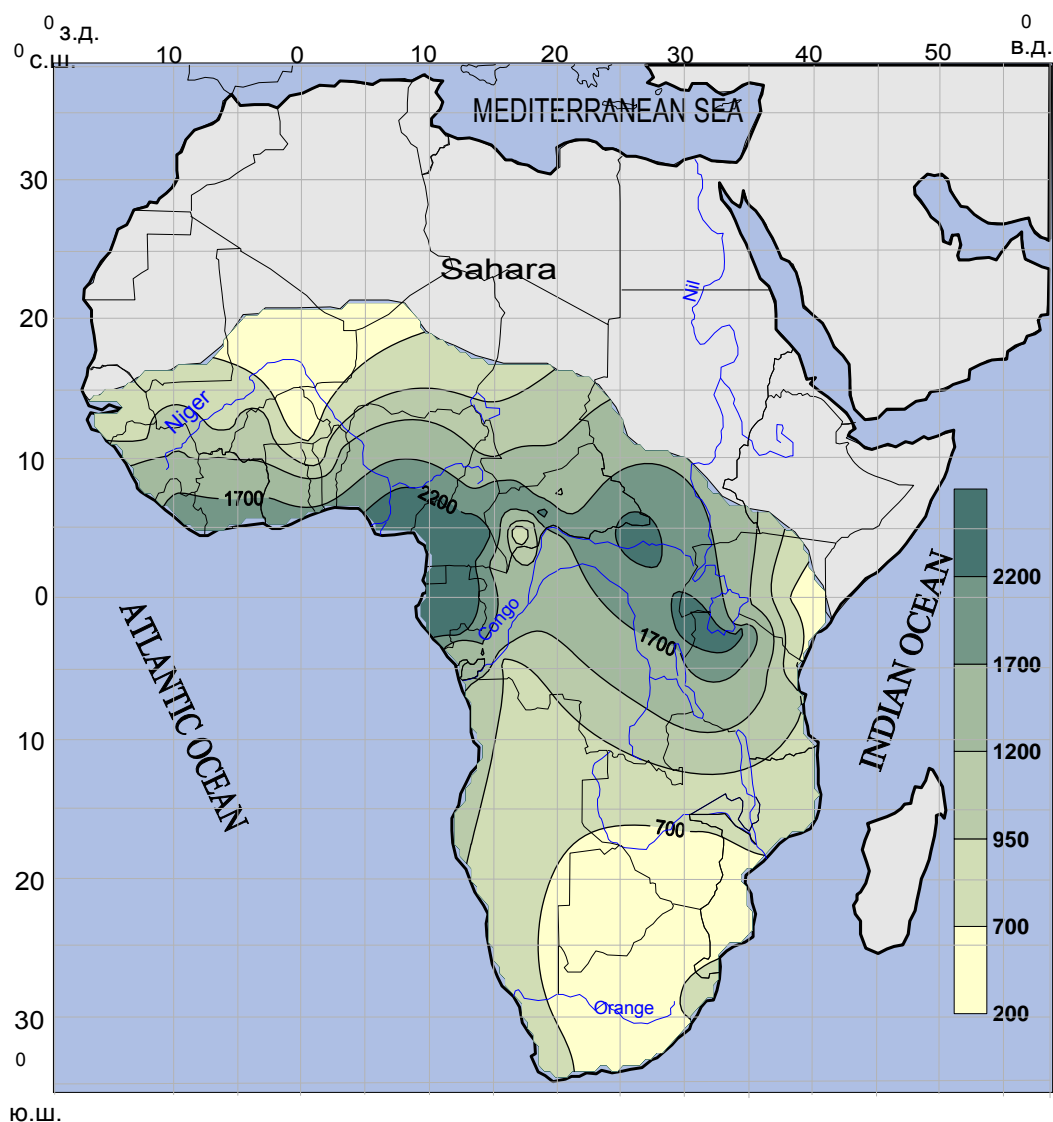


Рисунок 3.16 – Прогнозные значения нормы осадков по сценарию SRB1 на период от 2040 по 2069 гг.

Сценарий SRB1 можно назвать самым неблагоприятным с точки зрения распределения нормы осадков для Южной Африки. На этой территории норма осадков уменьшится по сравнению с остальными сценариями в среднем на 14 %. Но по сравнению с современными условиями ситуация мало изменится, значительные изменения затронут восточное побережье Южной Африки. На остальной территории сценарий дает похожее распределение нормы с уже рассмотренными сценариями.

Что касается прогнозных норм температуры воздуха, то в среднем по территории по сценарию Commit норма не изменится. Для сценария SRAB1 – увеличится на 1,52 °С, что составляет 6,8 % от текущих норм, для сценария SRA2 – увеличится на 1,49 °С (6,6 %), для сценария SRB1 – увеличится на 0,96 °С (4,3 %).

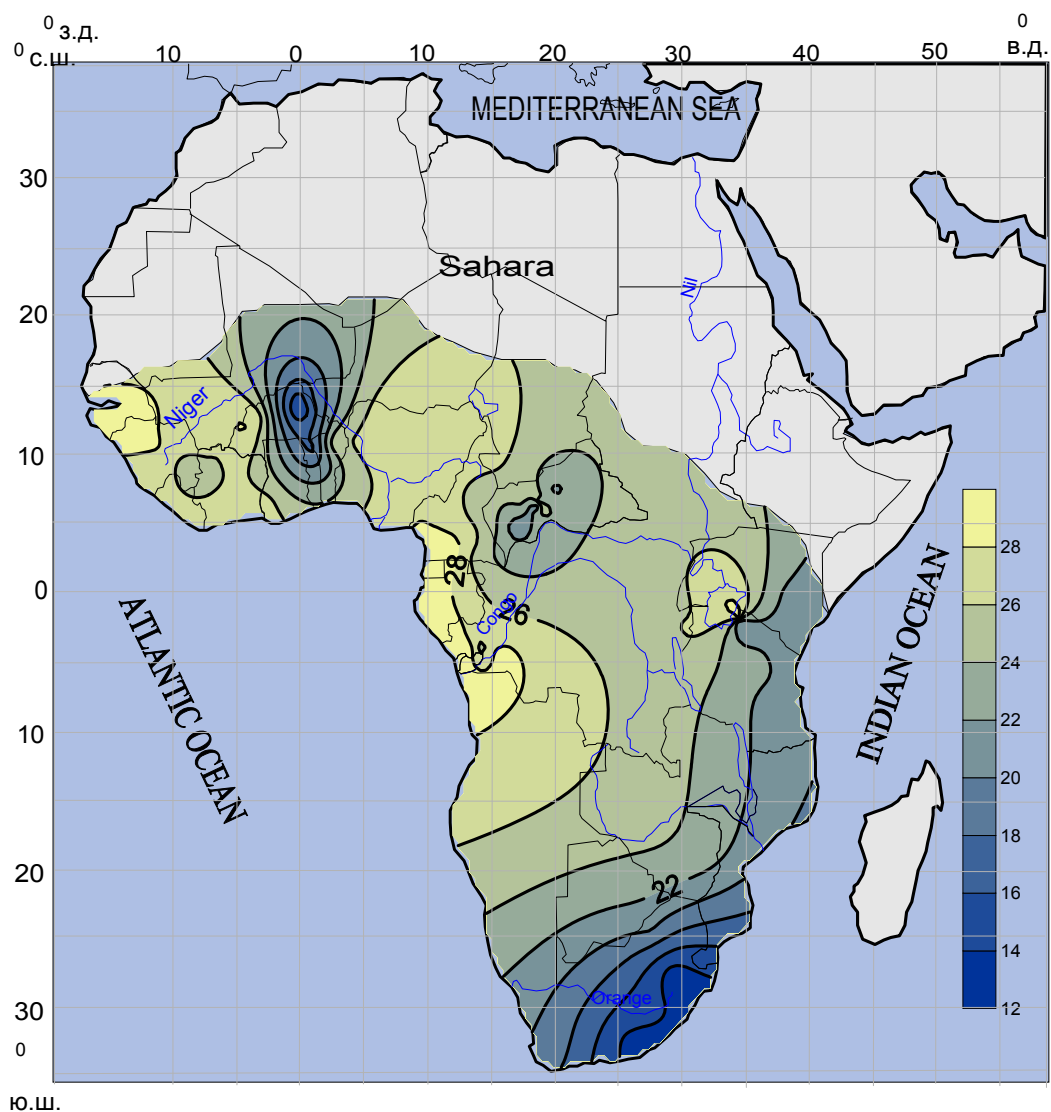


Рисунок 3.17 – Прогнозные значения нормы температуры приземного воздуха по сценарию Commit на период от 2040 по 2069 гг.

По сценариям распределение нормы температуры значительно изменится для Западной Африки, в которой произойдет значительное уменьшение нормы в бассейне р. Нигер в среднем на 11 %. Перераспределение нормы

температуры произойдет и в центральной части Юго-Западной Африки. Подобное изменение можно связать с учетом сценария влияния Атлантического океана.

По сценарию SRAB1 ситуация с распределением нормы температуры схожа со сценарием Commit. Отличие в бассейне р. Конго.

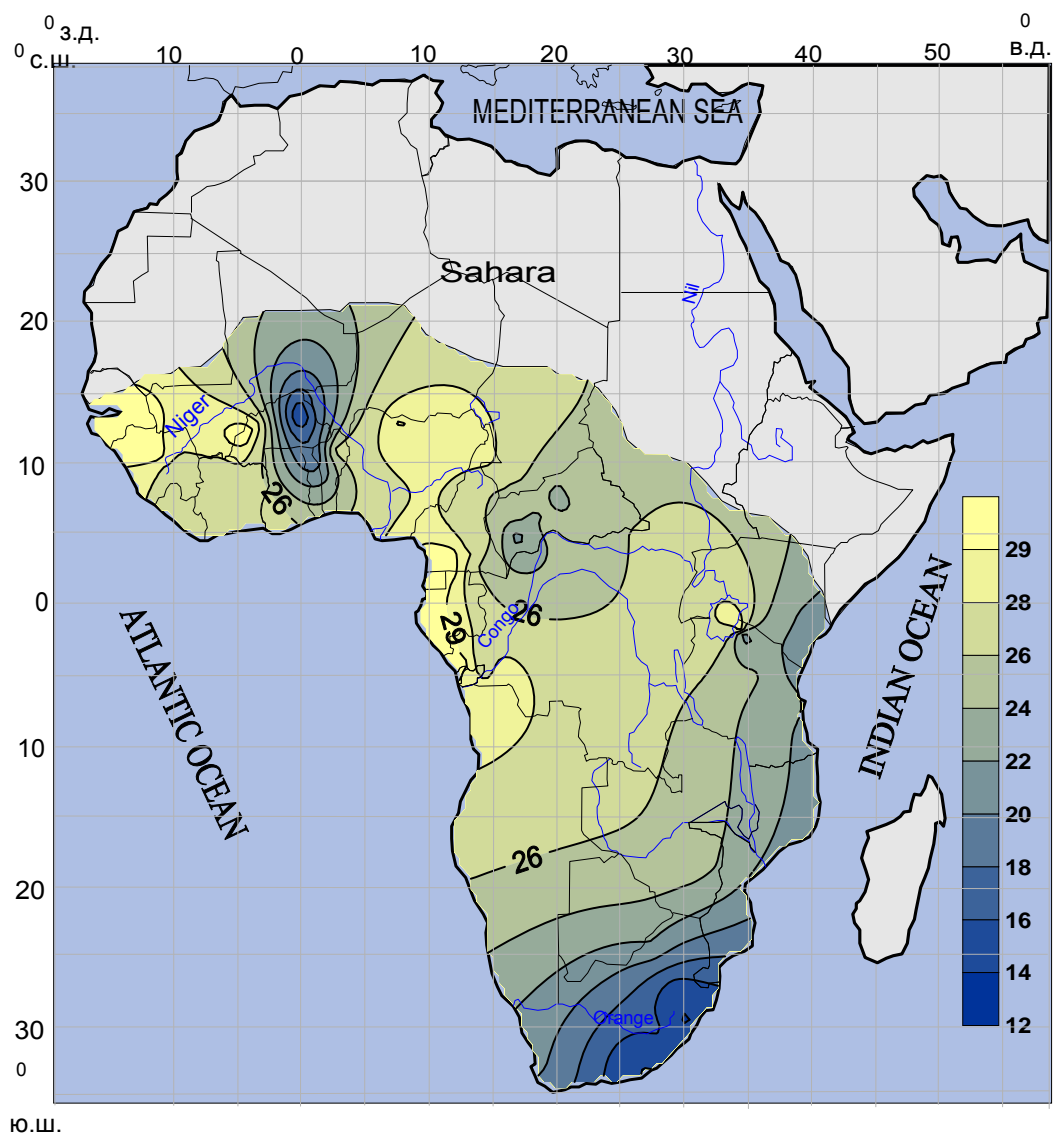


Рисунок 3.18 – Прогнозные значения нормы температуры приземного воздуха по сценарию SRAB1 на период от 2040 по 2069 гг.

Сценарии SRA2 и SRB1 схожи между собой, но отличны от уже рассмотренных. По ним норма среднегодовой температуры значительно увеличится в бассейне р. Конго.

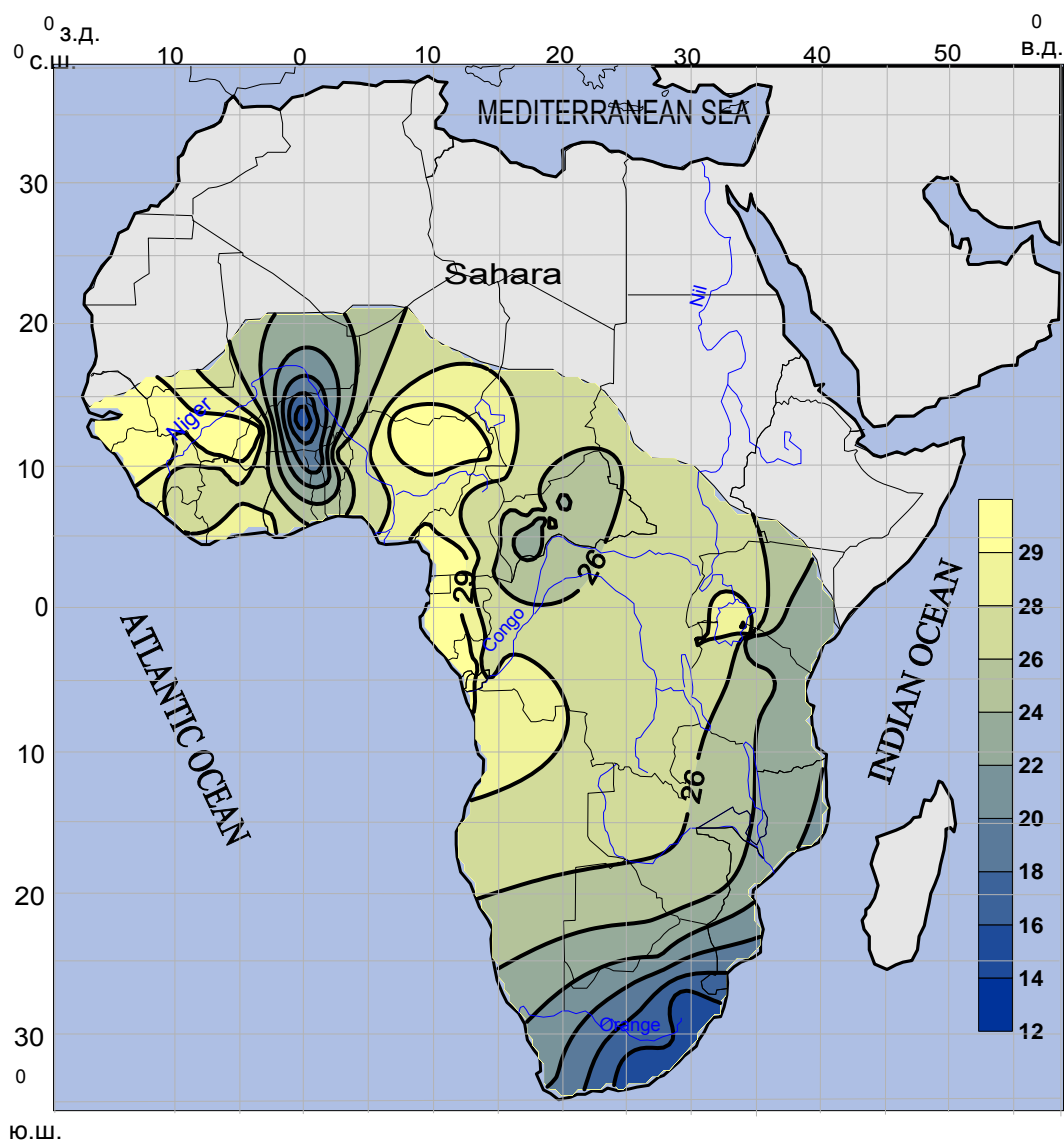


Рисунок 3.19 – Прогнозные значения нормы температуры приземного воздуха по сценарию SRA2 на период от 2040 по 2069 гг.

В итоге получено, что для Южной Африки сценарии Commit, SRA1B, SRA2, SRB1 предполагают, что к 2070 году осадки уменьшатся в зависимости от сценария от 3 до 12 %, а температура поднимется на 1.4–3.2 °С. Для Западной Африки норма осадков увеличится примерно на 25 %, а норма температуры измениться в пределах двух процентов, что составляет примерно 0.5 °С.

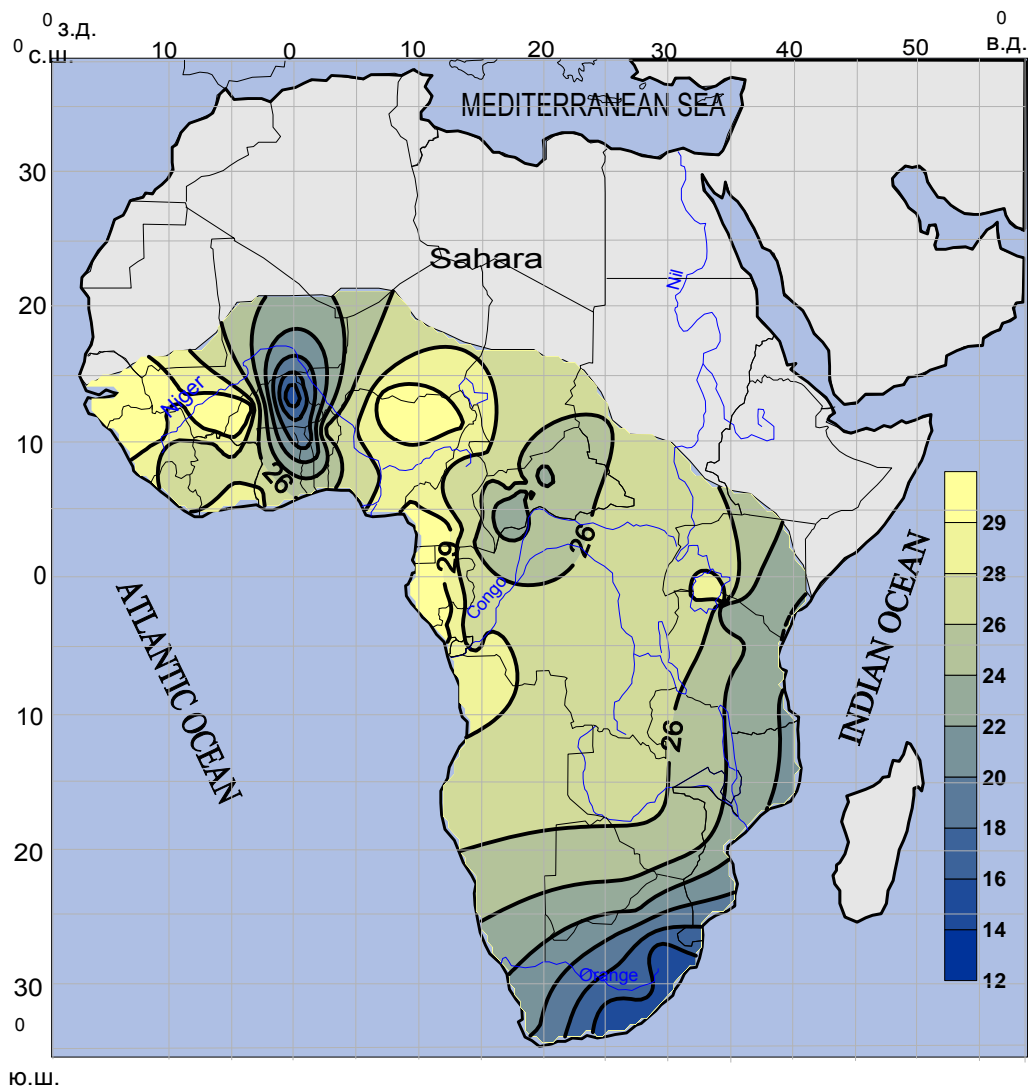


Рисунок 3.20 – Прогнозные значения нормы температуры приземного воздуха по сценарию SRB1 на период от 2040 по 2069 гг.

4 СЦЕНАРНАЯ ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Оценка долгосрочных изменений вероятностных характеристик многолетнего стока Юго-Западной Африки производилась с использованием климатических сценариев Commit, SRA1B, SRA2, SRB1 по методике, изложенной в главе 2.

При параметризации модели были рассчитаны величины интенсивности внешнего белого шума $G_{\tilde{N}}$, и впервые для Юго-Западной Африки эта характеристика была закартирована (рисунок 4.1). Была сделана попытка сопоставить карту распределения $G_{\tilde{N}}$ с картой распределения β : изолинии никак не коррелируют друг с другом ($r = 0,13$). Это объясняется тем, что параметр устойчивости β – 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.

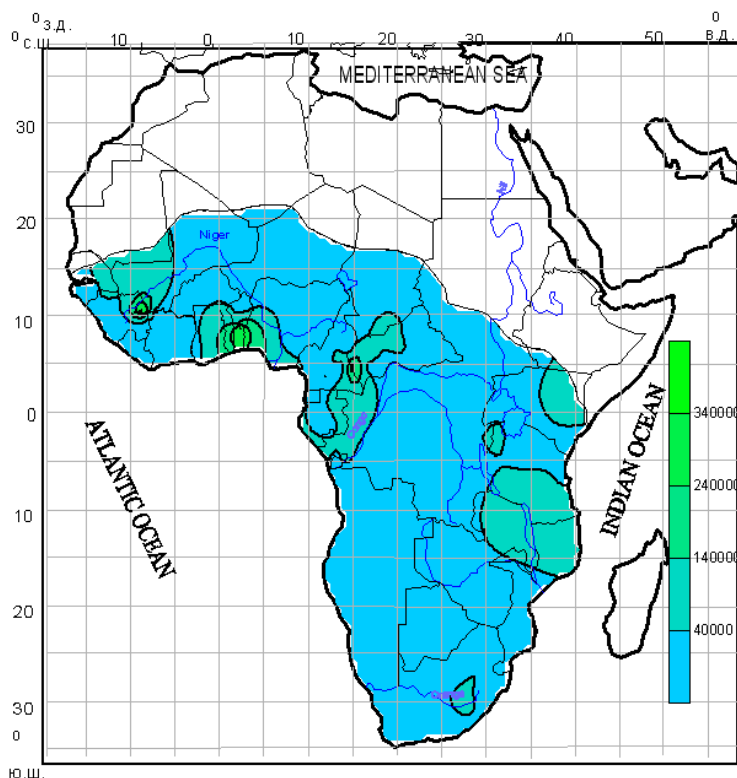


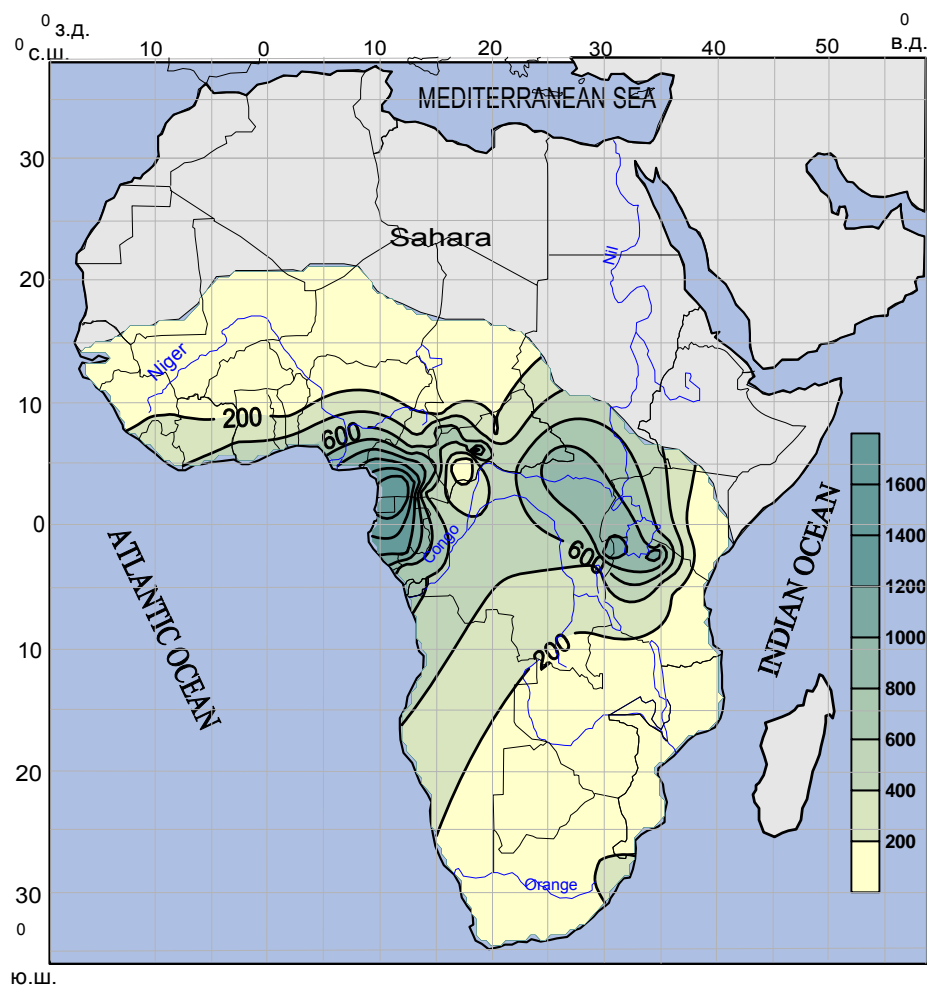
Рисунок 4.1 – Распределение по территории Юго-Западной Африки значений интенсивности внешнего белого шума ($G_{\tilde{N}}$).

4.1 Оценка нормы стока и коэффициента вариации

На рисунке 4.2 приведены карты нормы слоя стока \bar{h} и коэффициента вариации для сценария Commit на 2040–2069 гг.

Как видно из карт существенное изменение водности (нормы \bar{h}) будет происходить практически на всей территории Юго-Западной Африки. К 2070 году ожидается уменьшение нормы многолетнего годового стока в бассейнах рек Оранжевая, Лимпопо, Конго и Сенегал. На западном побережье следует ожидать увеличение нормы стока. Существенное изменение коэффициента вариации прогнозируется, в основном, в Южной и Центральной Африке. Это создает существенную угрозу для нормальной эксплуатации гидротехнических сооружений, расположенных в бассейнах рек Конго, Лимпопо и в верхнем течении р. Нигер.

a)



б)

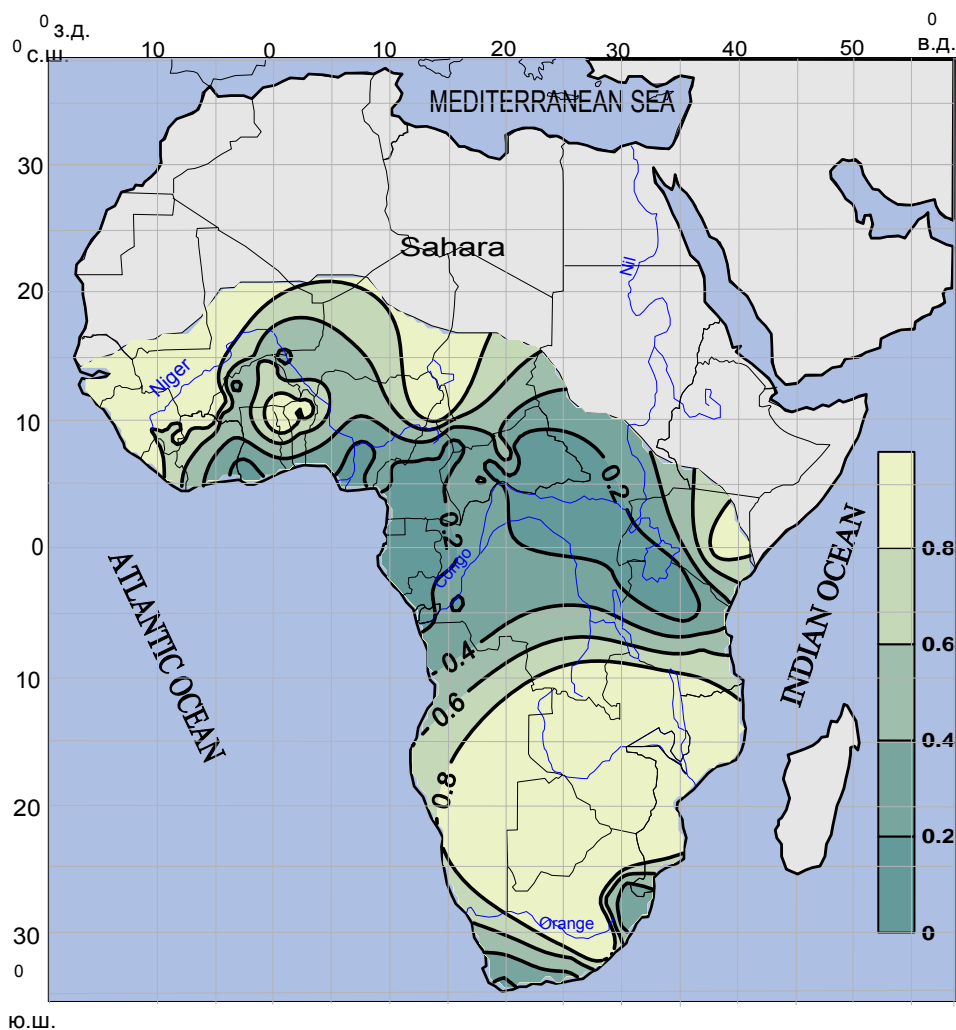
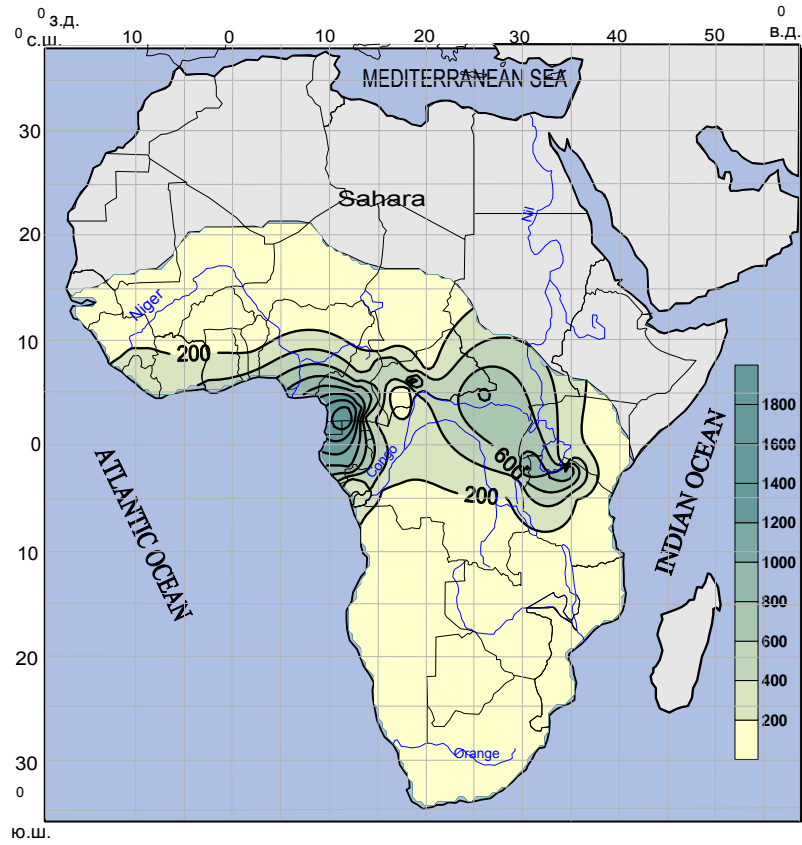


Рисунок 4.2 – Прогнозные значения нормы (а) и коэффициента вариации (б) по сценарию Commit на период от 2040 по 2069 гг.

На рисунках 4.3 – 4.5 показаны карты прогнозных нормы слоя стока и коэффициента вариации для сценариев SRB1, SRA2 и SRA1B.

Получены схожие между собой и со сценарием Commit оценки. В Южной Африке норма стока уменьшится: по сравнению с современной картой изолиния 200 мм/год сдвинется на север, оставляя за собой речные бассейны таких крупных рек как Лимпопо, Оранжевая. В Западной Африке эта же изолиния окажется правее от бассейна верхнего течения Нигера и реки Сенегал: полупустыня и пустыня захватят большие территории. Распределение коэффициента вариации связано с значениями нормы: большие значения соответствуют меньшим значениям коэффициента и наоборот.

a)



b)

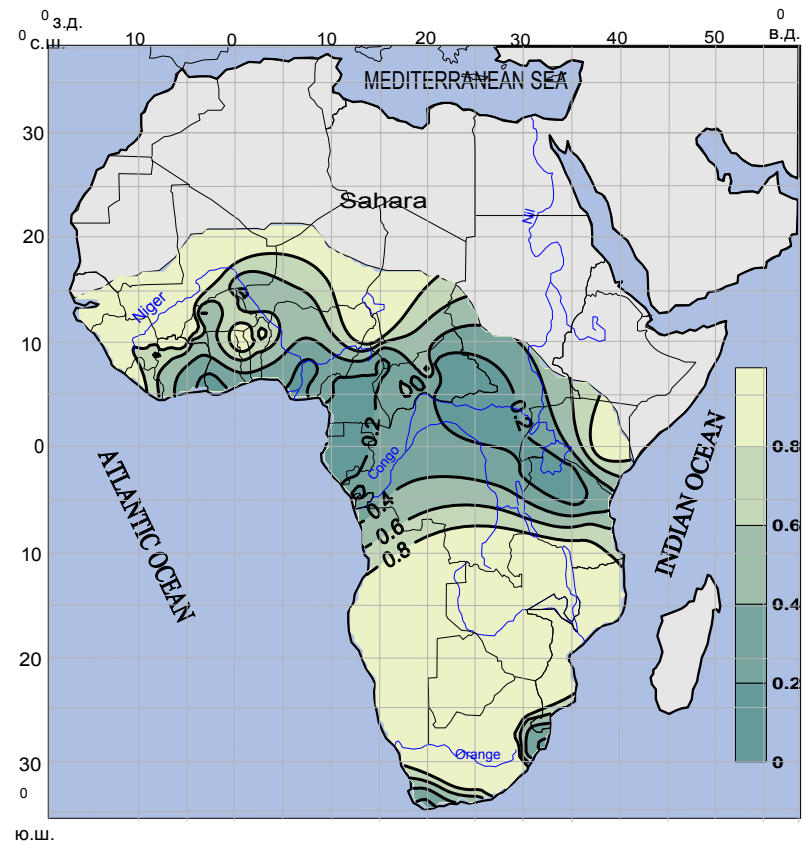
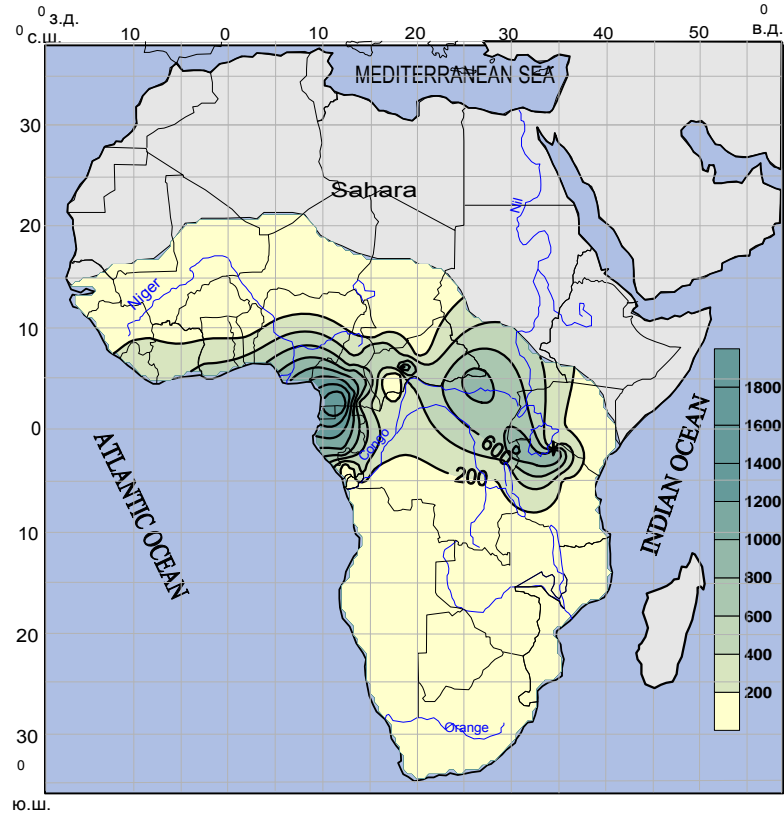


Рисунок 4.3 – Прогнозные значения нормы (a) и коэффициента вариации (б) по сценарию SRB1 на период от 2040 по 2069 гг.

a)



b)

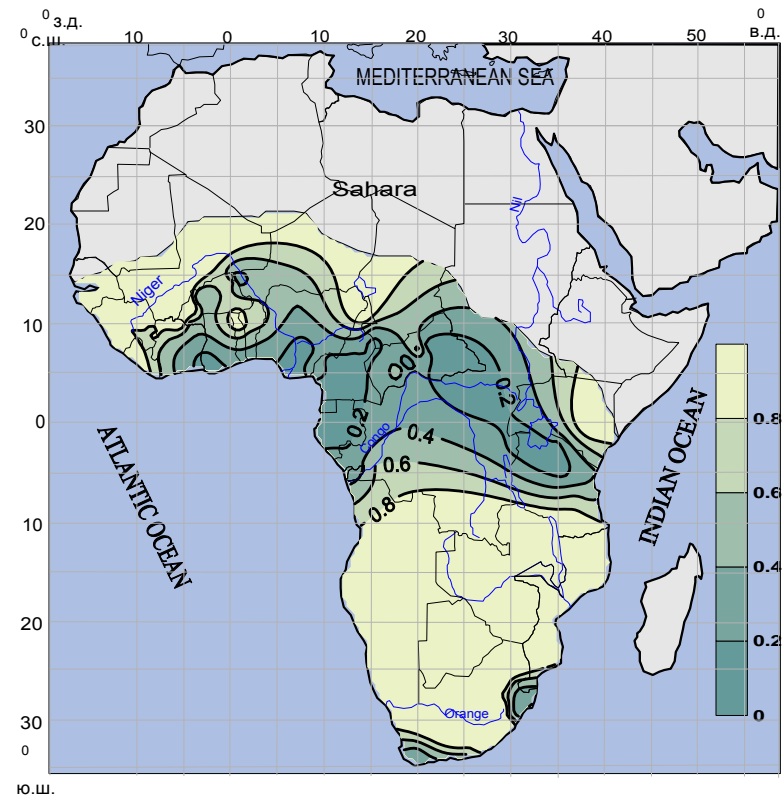
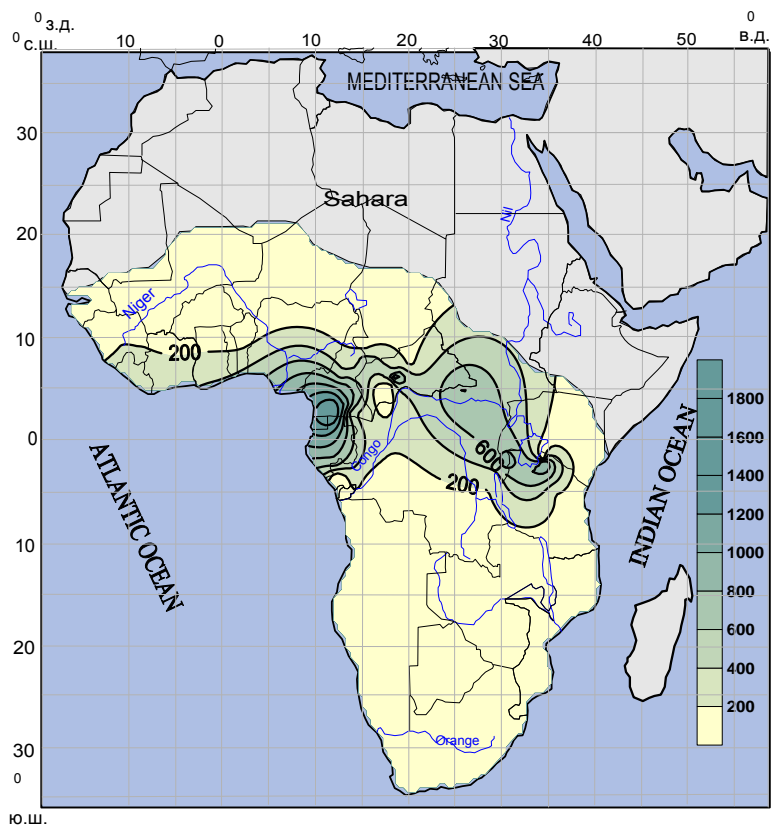


Рисунок 4.4 – Прогнозные значения нормы (a) и коэффициента вариации (б) по сценарию SRA2 на период от 2040 по 2069 гг.

a)



б)

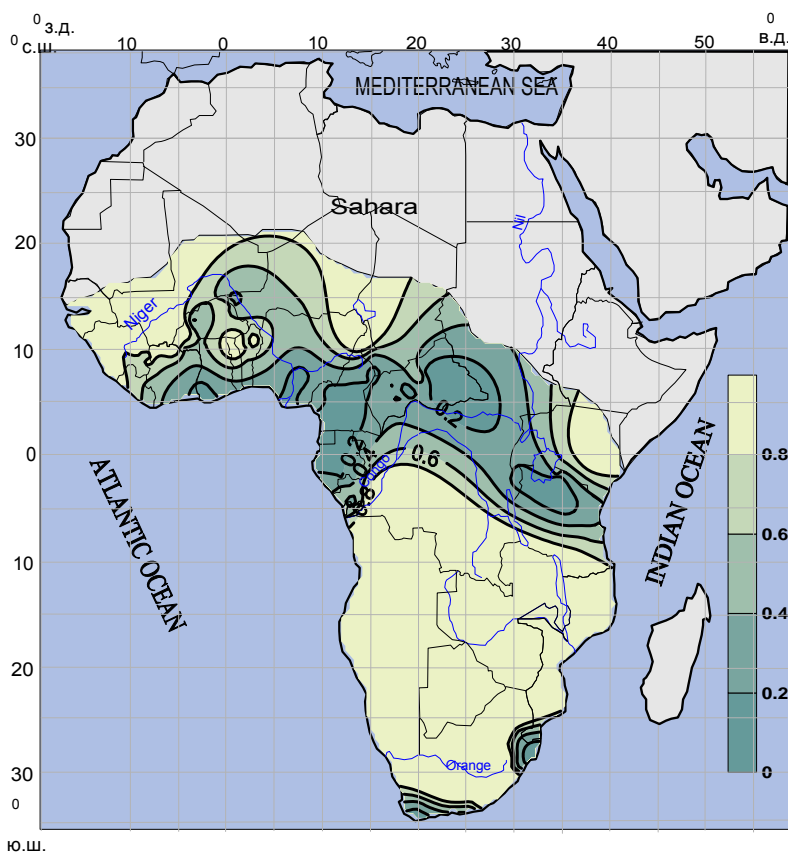


Рисунок 4.5 – Прогнозные значения нормы (а) и коэффициента вариации (б) по сценарию SRA1B на период от 2040 по 2069 гг.

Карты прогнозных статистических характеристик речного стока на период от 2040 по 2069 гг. по различным климатическим сценариям приведены в Приложении А.

4.2 Прогноз критерия устойчивости β

Прогноз критерия устойчивости осуществлялся с помощью построенной зависимости коэффициента автокорреляции от модуля стока (рисунок 4.6). Коэффициент корреляции аппроксимирующей прямой линии с полем точек равен 0,56. При прогнозах линейная аппроксимация с меньшим числом степеней свободы позволяет получить меньшее значение среднеквадратической погрешности и, как следствие, меньшее соотношение ее к среднеквадратическому отклонению, нежели аппроксимация прогностической зависимости полиномом с большим числом степеней свободы при прочих равных условиях [42].

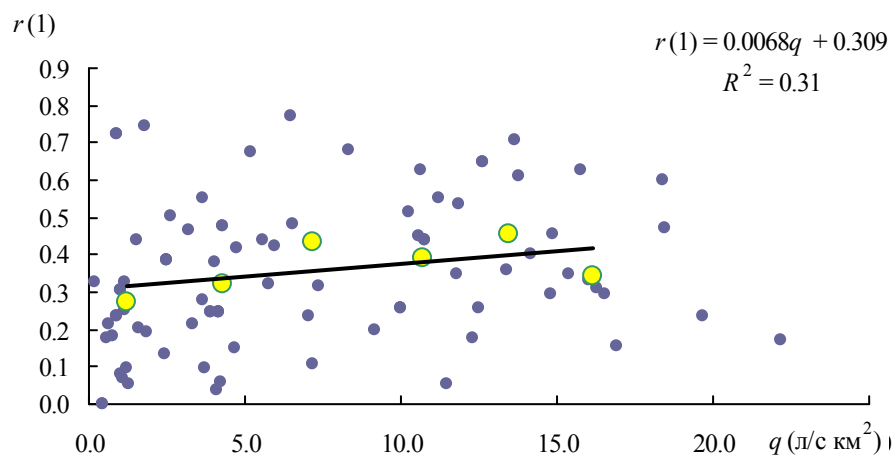


Рисунок 4.6 – Зависимость коэффициентов автокорреляции от модуля стока.

С учетом прогнозных значений слоя стока, коэффициента стока и, полученного по зависимости, коэффициента автокорреляции были рассчитаны прогнозные значения критерия устойчивости по рассматриваемым климати-

ческим сценариям. На рисунке 4.7 показано распределение прогнозных значений критерия устойчивости по территории Юго-Западной Африки на 2070 год по сценарию Commit (остальные карты представлены в Приложении Б). Получено, что в будущем вся территория Юго-Западной Африки будет неустойчива по второму моменту.

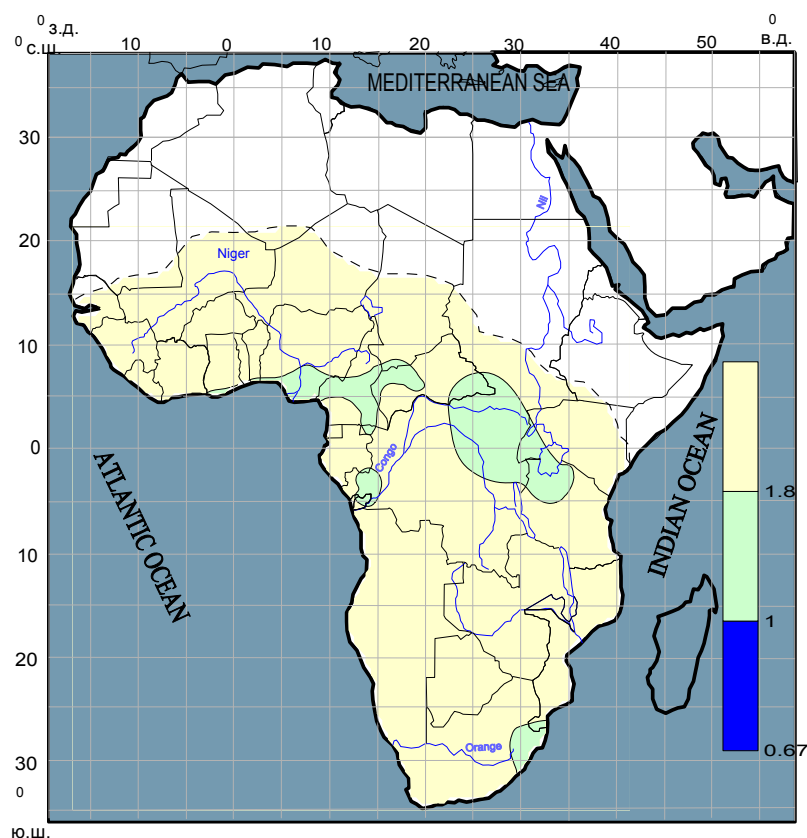
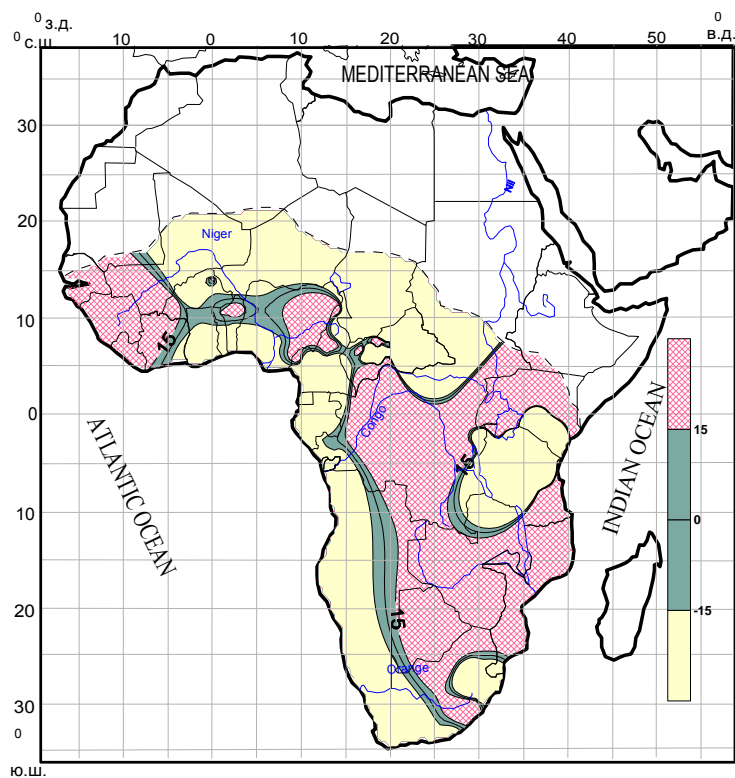


Рисунок 4.7 – Распределение прогнозных значений критерия устойчивости по территории Юго-Западной Африки на 2070 год по сценарию Commit.

4.3 Выявление аномальных зон

Под аномальными зонами понимались те регионы, в которых отклонения сценарных значений от фактических статистически значимы (различие превосходит погрешности определения фактических значений): для нормы отклонения превышают 15 %, а для коэффициента вариации – 20 %. На рисунке 4.8 показано распределение подобных зон по сценарию Commit.

a)



б)

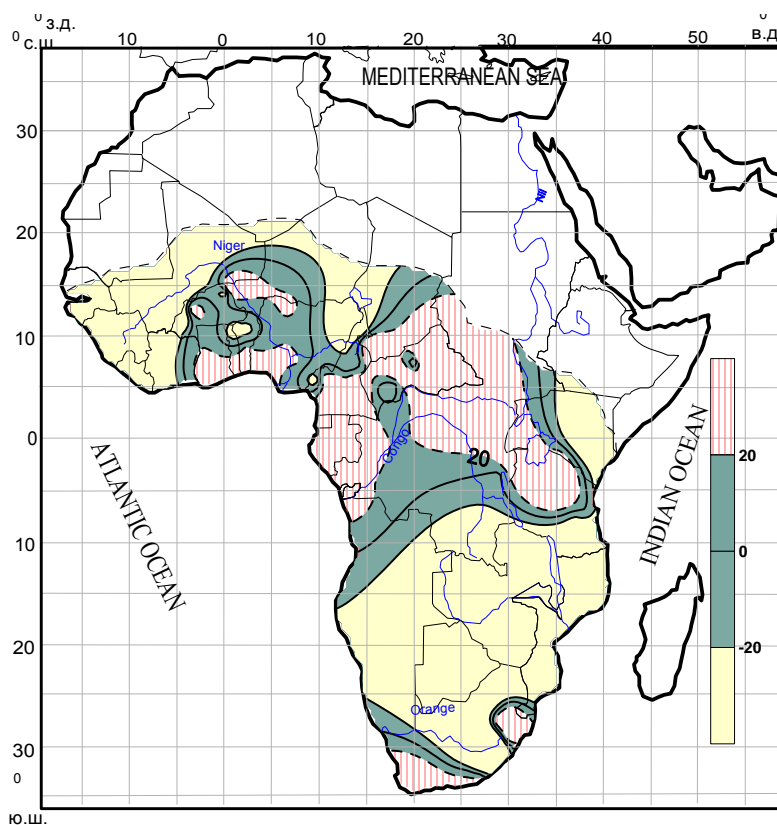


Рисунок 4.8 – Аномальные регионы для нормы стока (а) и коэффициента вариации (б) по сценарию Commit на 2040–2069 гг.

Как видно на рисунке 4.8 существенного изменения водности (нормы \bar{h}) следует ожидать на территории Центральной и Южной Африки. Ожидается существенное уменьшение нормы многолетнего годового стока, что существенно может сказаться на водообеспеченности государств, находящихся в этих районах. Одновременно в этом же регионе будет наблюдаться существенное (более, чем на 20 %) увеличение коэффициентов вариации. Это создаст существенную угрозу для нормальной эксплуатации гидротехнических сооружений.

Последствия изменения климата по сценарию Commit

На рисунках 4.9–4.11 (карты с аномальными зонами по норме стока и коэффициенту вариации) показано распределение дамб и плотин для целей водопотребления, выработки энергии и ирригации. Для гидротехнических сооружений важны не столько изменения нормы стока, сколько изменения коэффициента вариации, которые характеризуют межгодовые колебания стока.

На рисунке 4.9 видно, что 41 % гидротехнических сооружений расположено в бассейнах, в которых ожидается увеличение коэффициента вариации более чем на 20 %. В бассейнах, где ожидается уменьшение коэффициента вариации, расположено 59 % гидротехнических сооружений. На рисунке 4.10 следующая ситуация: 77 % – в бассейнах с увеличенным коэффициентом вариации и 23 % – с уменьшенным. На рисунке 4.11: 79 % и 21 % соответственно.

Прогнозные гидрометеорологические характеристики речных бассейнов Юго-западной Африки (сценарий Commit) представлены в таблице 4.1.

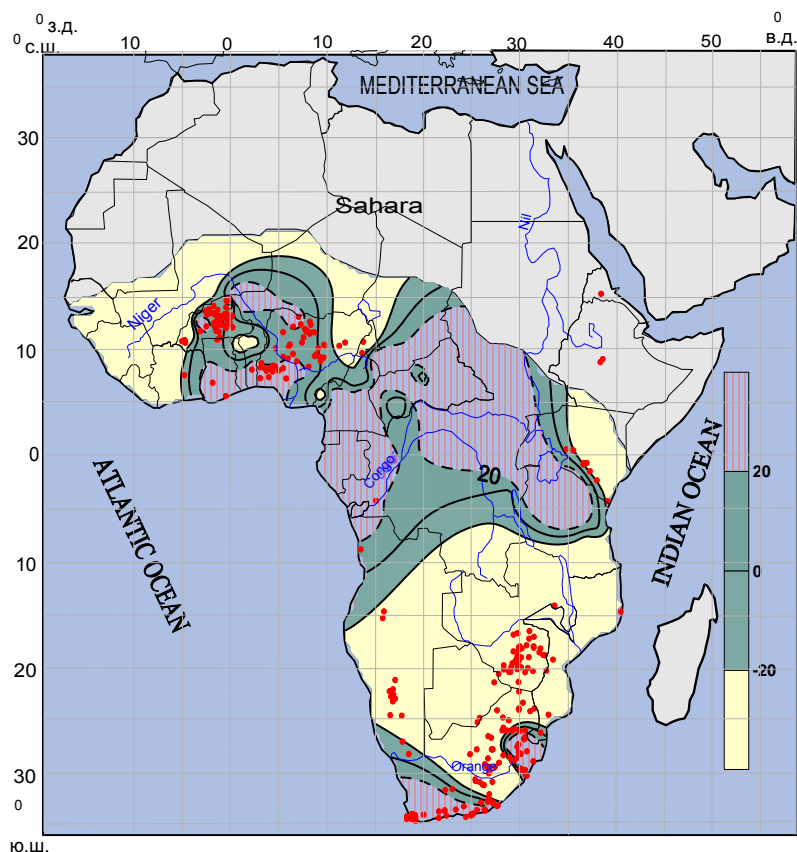
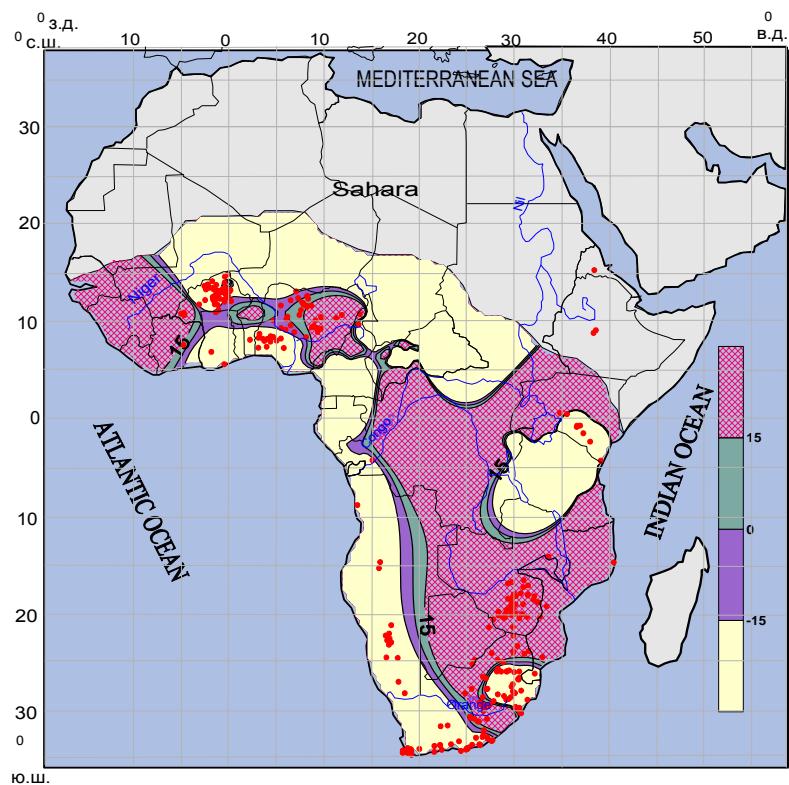


Рисунок 4.9 – Аномальные регионы для нормы стока (а) и коэффициента вариации (б) по сценарию Commit на 2040–2069 гг. с нанесенными гидротехническими сооружениями, используемыми для водопотребления.

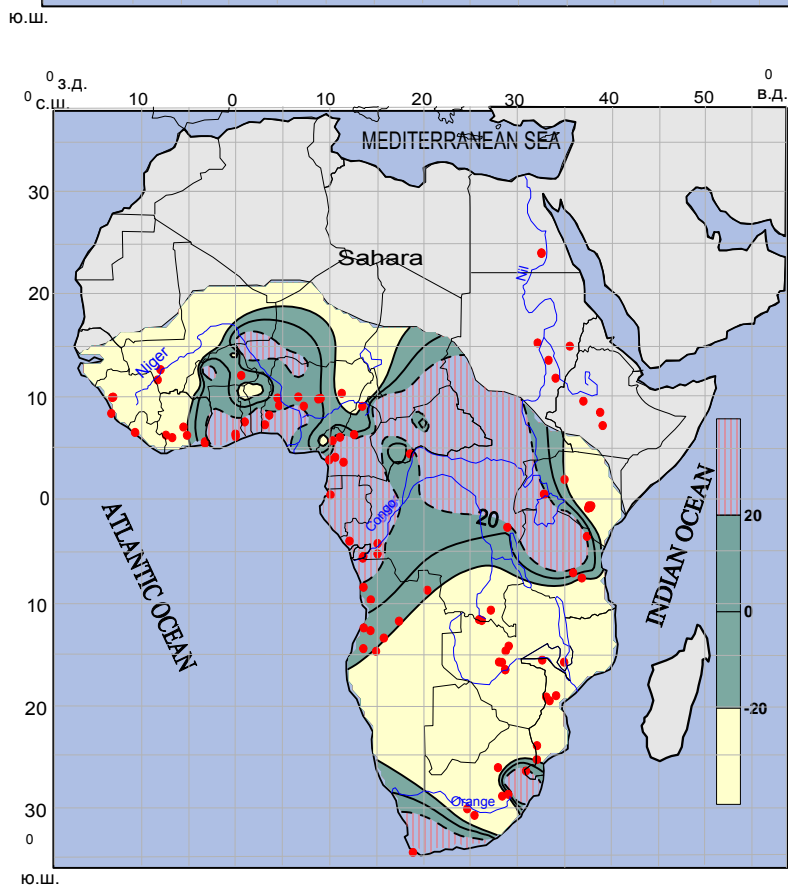
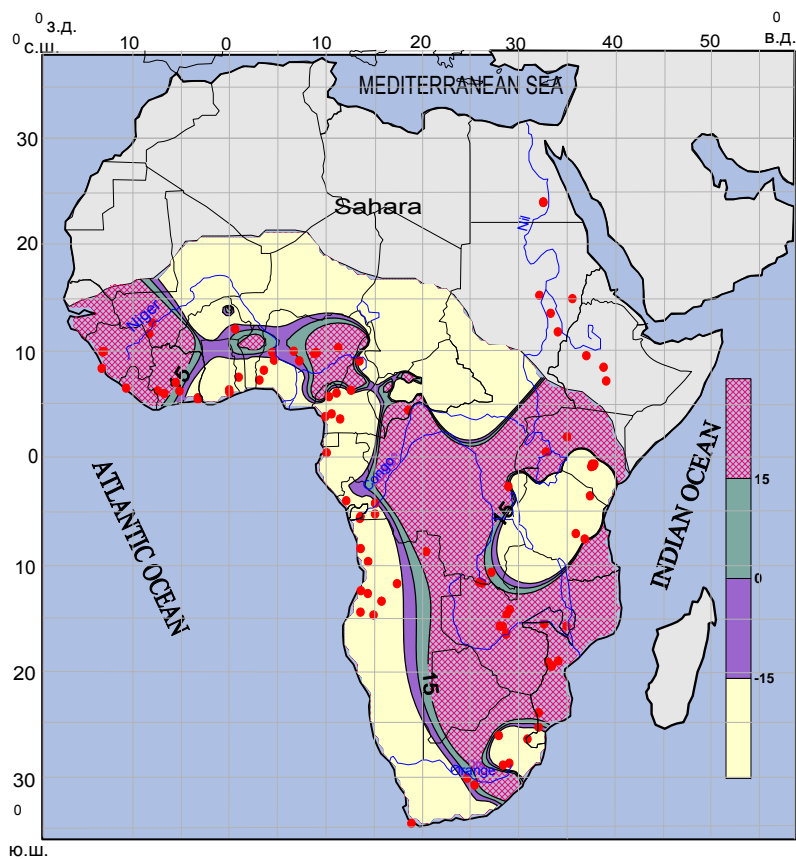


Рисунок 4.10 – Аномальные регионы для нормы стока (а) и коэффициента вариации (б) по сценарию Commit на 2040–2069 гг. с нанесенными гидро-энергетическими объектами.

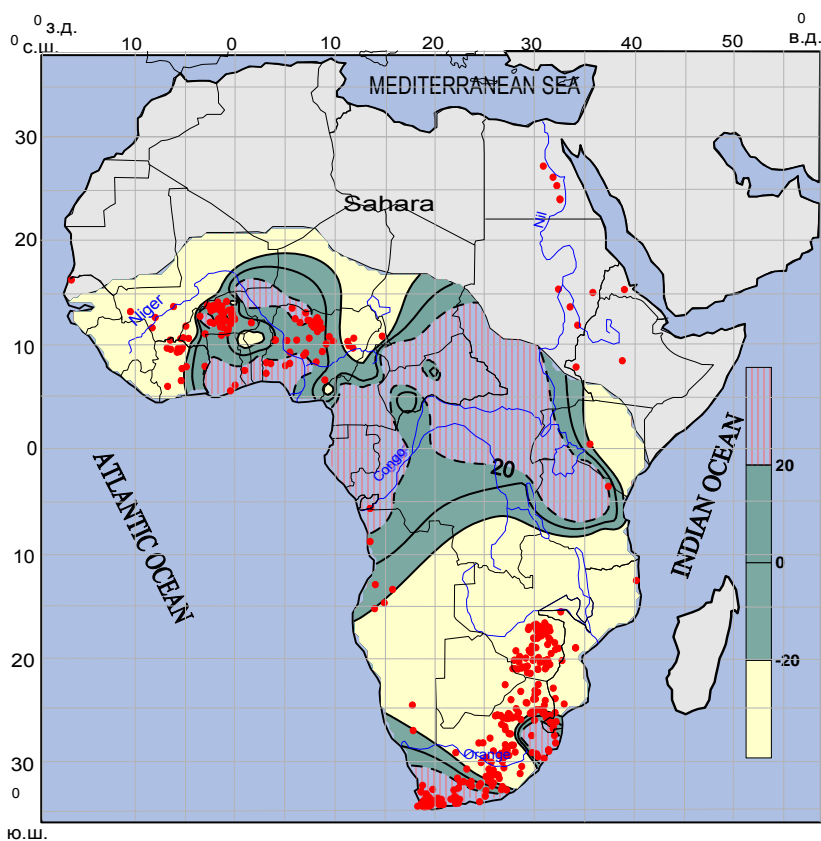
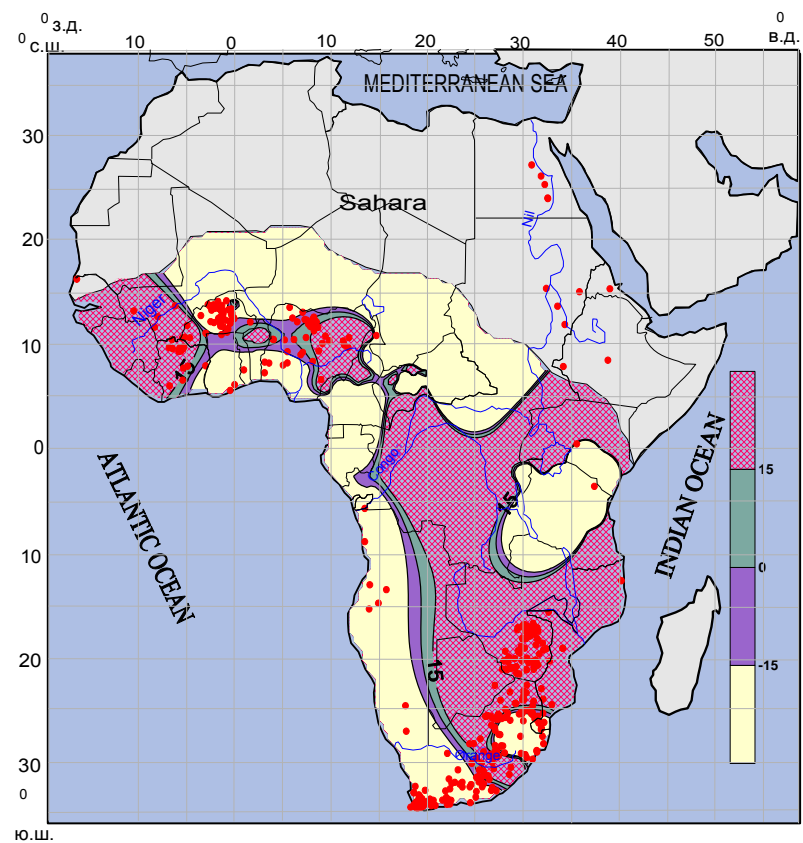


Рисунок 4.11 – Аномальные регионы для нормы стока (а) и коэффициента вариации (б) по сценарию Commit на 2040–2069 гг. с нанесенными гидротехническими сооружениями, используемыми для ирригации.

Таблица 4.1 – Прогнозные гидрометеорологические характеристики речных бассейнов Юго-западной Африки

Река	$T_{пр}$, °C	$X_{пр}$, м ³ /с	$Q_{пр}$, м ³ /с	$Cv_{пр}$	$Cs_{пр}$	$Q^{np}_{1\%}$	$Q^{факт}_{1\%}$	Δ , %
MILO	25,4	44,4	6,71	0,96	4,33	–	147	–
TINKISSO	28,2	35,6	0,58	4,10	8,57	–	68,7	–
NIGER	26,9	138	15,3	0,76	0,62	74,2	190	61,0
MILO	26,9	308	12,6	1,25	-3,85	–	110	–
NIANDAN	26,3	539	61,5	1,01	-0,56	222	328	32,5
NIGER	27,6	601	24,4	1,77	4,55	–	537	–
SANKARANI	25,2	888	110	0,56	2,09	614	513	-19,8
IRANE	25,7	42,5	2,89	0,93	1,44	21,3	26,9	20,7
ALIBORI	23,4	253	21,2	0,90	1,75	168	196	14,3
ALIBORI	23,3	251	21,1	0,59	0,21	73,0	81,9	10,9
PENDJARI	17,6	490	49,8	1,28	4,07	–	626	–
OUEME	20,8	796	133	0,67	0,56	584	501	-16,6
OUEME	21,6	1775	334	0,56	1,19	1530	1266	-20,8
BAGOE	25,8	103	11,3	0,80	2,39	92,8	158	41,4
TANO	26,7	945	219	0,12	0,12	326	244	-33,3
FALEME	28,2	440	8,79	2,49	2,14	189	1649	88,6
BAFING	27,2	529	25,6	1,23	0,45	185	613	69,9
SANKARANI	26,3	1161	68,2	0,97	0,21	344	883	61,1
SANKARANI	26,5	1170	61,3	1,80	3,42	–	1649	–
KOULOUNTOU	28,2	122	0,65	3,30	-2,66	–	28,5	–
GAMBIA	28,6	960	4,47	4,31	0,69	102	649	84,3
BLACK VOLTA	27,6	87,4	2,61	0,92	0,37	13,6	28,5	52,1
COMOE	27,4	76,9	3,04	1,16	1,11	24,1	40,1	39,8
LERABA	27,2	198	9,00	1,24	0,74	65,5	142	53,7
COMOE	27,3	322	15,1	0,55	0,23	49,9	59,8	16,5
BLACK VOLTA	28,0	441	9,80	0,95	0,53	57,0	94,6	39,8
BLACK VOLTA	27,6	1288	60,6	0,31	0,03	130	95,0	-36,4
DARGOL	16,4	44,3	2,20	0,65	0,16	8,15	9,23	11,7
MARADI	28,0	185	7,35	0,47	0,83	26,5	32,1	17,5
DARGOL	17,3	128	8,12	0,44	0,21	22,8	19,6	-16,6
GAROUOL	15,5	112	5,44	0,72	1,65	34,3	42,7	19,7
SIRBA	13,6	537	31,2	0,68	-0,15	102	77,4	-32,1
GOROUOL	17,1	719	29,1	0,35	1,19	94,9	64,9	-46,3
TSANAGA	27,4	52,1	2,33	1,15	4,31	–	66,6	–
BINI	26,6	109	32,0	0,10	-0,36	41,9	59,1	29,1
VINA	25,4	94,5	22,8	0,26	-1,42	31,0	49,0	36,7
NDJEKE	26,8	325	128	0,11	-0,40	169	63,0	-169,2
MAPE	26,1	275	83,7	0,15	-0,42	122	155	21,4

Продолжение таблицы 4.1

Река	T_{np} , °C	X_{np} , м ³ /с	Q_{np} , м ³ /с	Cv_{np}	Cs_{np}	$Q^{np}_{1\%}$	$Q^{факт}_{1\%}$	Δ , %
NOUN	27,4	412	156	0,13	0,10	239	181	-31,6
CROSS	27,9	636	248	0,34	-0,73	461	952	51,6
MBERE	24,9	439	122	0,19	0,59	219	246	11,1
NYONG	27,0	791	335	0,08	-0,42	219	125	-74,6
KADEI	25,9	729	285	0,06	0,22	354	185	-91,6
LOM	25,3	728	228	0,10	0,57	323	307	-5,4
NYONG	28,2	2072	953	0,11	-0,03	1348	530	-154,3
KADEI	25,7	1613	621	0,07	0,17	798	389	-105,1
DJEREM	25,8	1167	277	0,20	-0,05	488	672	27,5
MBAM	25,7	3233	1190	0,13	-0,64	1589	983	-61,6
LOGONE	25,1	2493	922	0,27	0,28	2071	1618	-28,0
MKOMAZI	13,2	44,5	12,1	0,57	1,47	62,7	56,3	-11,4
KEISKAMMA	12,9	41,9	4,86	0,51	1,12	19,7	17,0	-16,4
OLIFANTS	17,8	52,2	1,75	1,37	3,83	–	36,7	100,0
KLIP	13,1	103	27,2	0,44	1,39	110	67,1	-63,4
INCOMATI	15,3	124	19,7	0,40	0,71	59,6	52,0	-14,5
DORING	19,1	186	24,9	0,21	0,35	49,0	31,2	-57,2
TUGELA	13,4	854	282,3	0,27	0,27	630	333	-88,8
GROOT-VIS	13,6	352	11,4	0,49	0,60	34,4	34,2	-0,8
VAAL	13,5	810	147	0,45	1,10	542	334	-62,3
ODZI	22,9	52,6	1,24	1,66	1,05	13,6	33,0	58,9
MUNYATI	23,4	56,4	1,15	2,45	2,65	27,6	35,2	21,6
ODZI	22,9	52,6	1,24	1,66	1,05	13,6	33,0	58,9
ODZI	22,9	52,6	1,24	1,66	1,05	13,6	33,0	58,9
MUNYATI	23,4	56,4	1,15	2,45	2,65	27,6	35,2	21,6
SAVE	23,1	225	4,02	2,65	2,77	108	205	47,3
KILOMBERO	21,1	1124	179	0,60	0,69	667	1205	44,6
PANGANI	21,1	527	20,7	0,30	0,67	124	60,6	-103,8
RUVU	21,7	532	76,4	0,46	1,40	53,0	254	79,3
NYABARONGO	25,0	690	273	0,05	-0,12	316	125	-153,4
NYABARONGO	24,8	1118	444	0,04	0,13	321	171	-87,1
KAGERA	24,8	2309	918	0,05	0,32	516	427	-20,9
NIARI	28,9	1320	362	0,09	-0,42	461	424	-8,6
NYANGA	28,5	574	230	0,13	-0,34	333	295	-12,7
NIARI	28,9	1320	362	0,09	-0,42	461	424	-8,6
KOUILOU	28,8	4133	1106	0,12	-0,08	1560	1350	-15,5
NIARI	28,7	1853	541	0,08	-0,33	689	510	-35,0
OUHAM	24,6	1409	434	0,35	0,76	1279	1174	-8,9
FOULAKARY	28,9	216	53,8	0,17	-0,14	84,3	85,2	1,0
OUHAM	24,7	2744	826	0,16	-0,34	1260	585	-115,5
LOBAYE	24,7	2092	721	0,07	0,27	964	565	-70,6

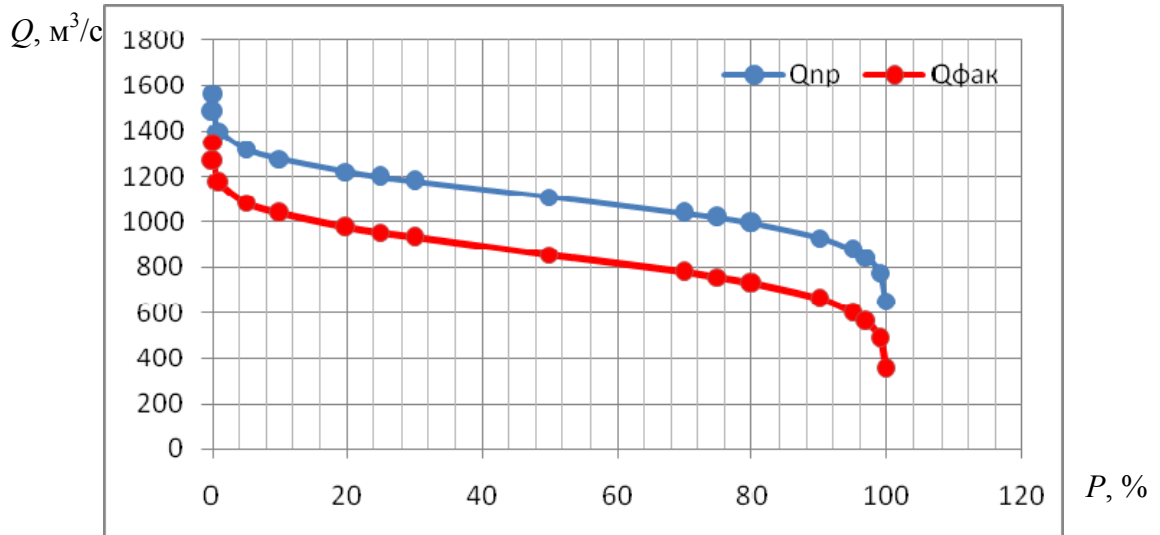
Продолжение таблицы 4.1

Река	$T_{пр}$, °C	$X_{пр}$, м ³ /с	$Q_{пр}$, м ³ /с	$Cv_{пр}$	$Cs_{пр}$	$Q^{np}_{1\%}$	$Q^{факт}_{1\%}$	Δ , %
МРОКО	24,5	677	214	0,22	0,44	431	303	-42,1
DJA	26,8	3549	1477	0,10	0,00	2022	815	-147,9
SEMLIKI	24,8	615	245	0,18	1,03	501	573	12,5
RUSIZI	25,2	748	163	0,29	0,75	402	526	23,5
MUREMBWE	25,2	52,6	12,7	0,27	-0,06	24,2	33,4	27,6
OUHAM	24,6	1409	434	0,35	0,76	1279	1174	-8,9
FAFA	24,7	415	125	0,17	-0,10	198	95	-109,6
OUHAM	24,7	2744	826	0,16	-0,34	1260	585	-115,5
LOBAYE	24,7	2092	721	0,07	0,27	964	565	-70,6
МРОКО	24,5	677	214	0,22	0,44	431	320	-34,4
TOMI	24,5	140	40,7	0,24	0,01	76,2	815	90,7
MBOMOU	26,1	1936	566	0,18	0,03	944	503	-87,8
TANA	21,5	928	38,9	0,93	2,32	39,2	638	93,8

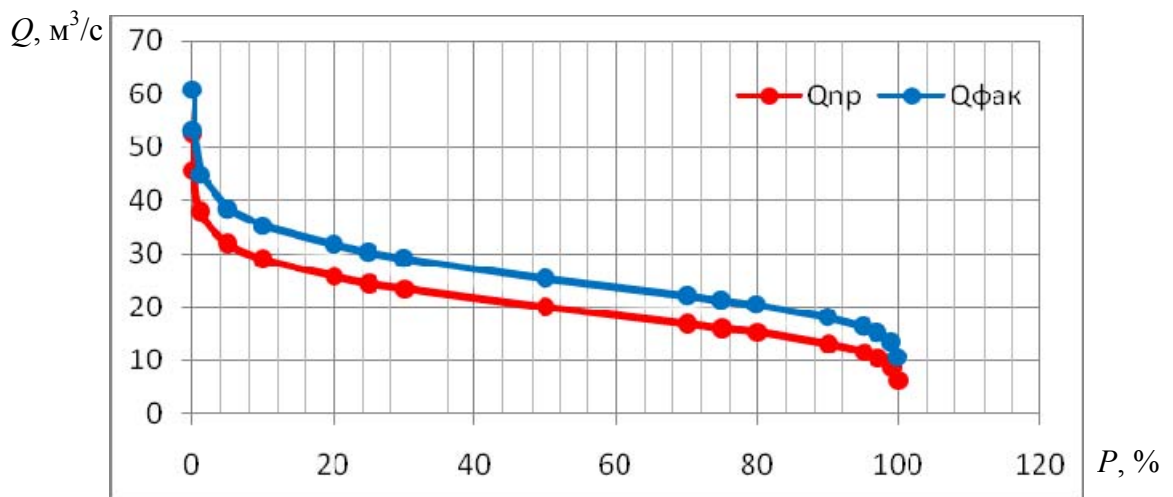
Примечание – прочерки в обеспеченных значениях расходов воды появились из-за использования таблицы Пирсона, входом в которую являются значения коэффициента асимметрии определенного диапазона.

В результате построения кривых обеспеченности по статистическим моментам для текущего климата и по прогнозным моментам (по климатическому сценарию Commit) определены фактическое и прогнозное значение расходов воды 1 % обеспеченности для некоторых бассейнов. Кривые обеспеченности представлены на рисунке 4.12. Получено, что, например, $Q^{np}_{1\%}$ для реки Black Volta станция Vogomo (страна Буркина Фасо) будет 129 м³/с; для река Niger станция Faganah (страна Гвинея) 74,1 м³/с; для река Oume станция Wonon (страна Бенин) 1530 м³/с; для река Oume станция Wonon (страна Бенин) 238,55 м³/с. Например для реки Black Volta, прогнозное обеспеченное значение превышает текущие на 32 %, что может сказаться на надежности гидротехнических сооружений, опирающихся только на рассчитанные, а не прогнозные, обеспеченные значения расходов воды.

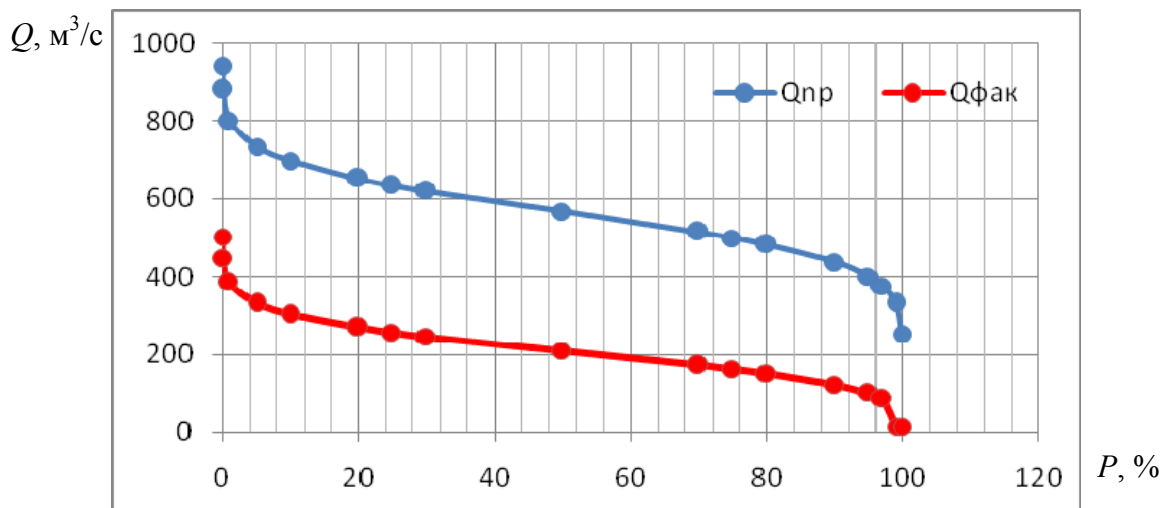
a)



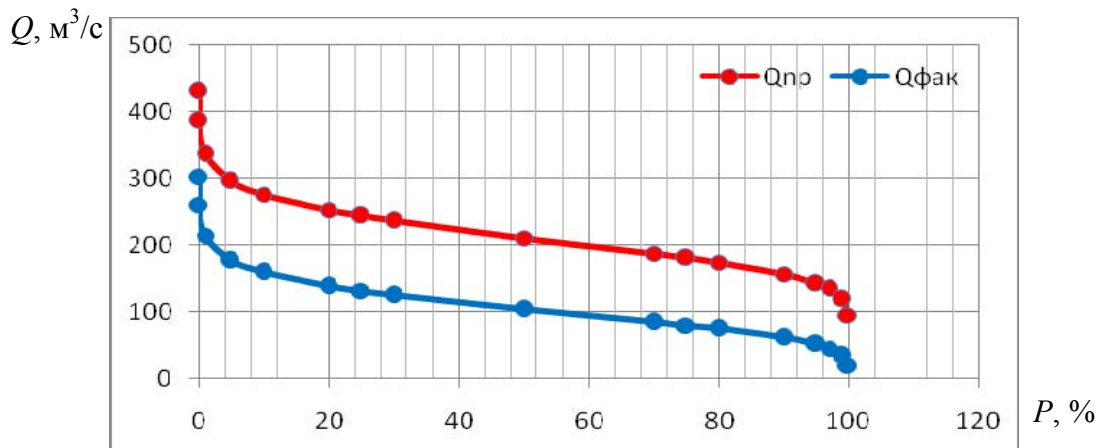
б)



в)



з)



д)

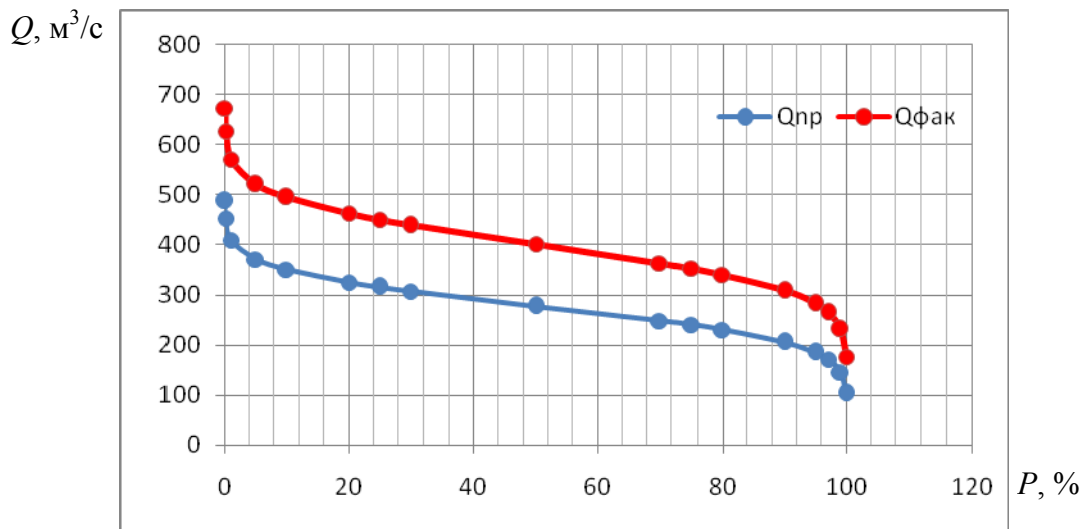


Рисунок 4.12 – Кривые обеспеченности а – р. Black Volta – ст. Borgomo (Буркина Фасо), б – р. Niger – ст. Faranah (Гвинея), в – р. Oume – ст. Bonon (Бенин), з – р. Noun – ст. Bassoufam (Камерун), д – р. Njerem – ст. Мбакаоу (Камерун).

Для наглядности на рисунке 4.13 представлен график сравнения обеспеченных прогнозных и фактических значений расходов воды для некоторых водосборов Юго-Западной Африки. На этой графике видно, что 53 % рек имеют большие прогнозные значения.

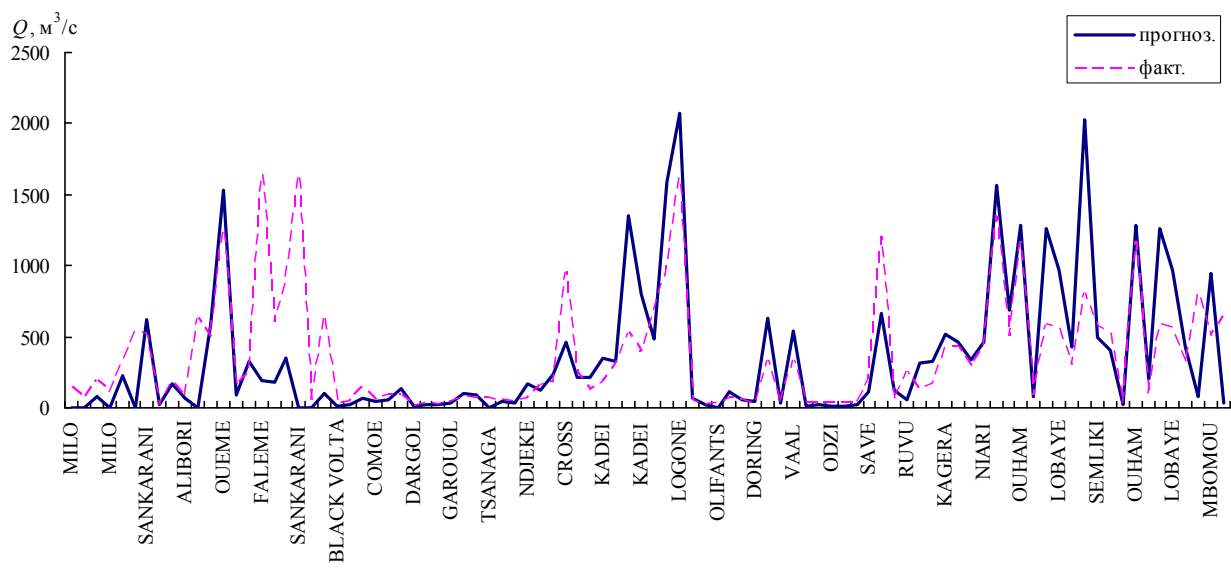


Рисунок 4.13 – График сравнения обеспеченных значений расходов воды.

5 ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМНОЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ АФРИКЕ

Рост режимной гидрологической сети Африки происходил, в основном, после колонизация в 50–60-х годах прошлого столетия, как попытка преодоления экономической отсталости стран. Площадь водосборов рек Юго-Западной Африки к югу от Сахары составляет примерно $1\,782\,229\text{ км}^2$ – на один стоковой пост приходится $15\,498$ тыс. км^2 (при числе станций равном 115). Это намного больше, чем рекомендует Всемирная Метеорологическая Организация [43] (ВМО рекомендует 1 тыс. км^2 на один стоковой пост). Получается, что сеть постов надо увеличивать в 15 раз, что нецелесообразно с экономической точки зрения и не подтверждается с точки зрения существующих научно обоснованных критериев оптимальной режимной сети, разработанных в бывшем СССР. Эти критерии учитывают не только физико-географические условия формирования стока, но и точность его учета, что связано с общим экономическим развитием страны [44]. Для стран Юго-Западной Африки важны ни общие умозрительные рекомендации ВМО, а конкретные численные оценки оптимальной сети [45].

Оптимальное число постов для Юго-Западной Африки находилось по методике, разработанной в ГГИ Карасевым И. Ф. [46].

Методика ГГИ позволяет определить такую густоту пунктов наблюдений, которая была бы достаточной для получения надежных, репрезентативных гидрологических характеристик и не требовала бы неоправданных материальных затрат.

В качестве исходных характеристик при обосновании оптимальной сети принимаются:

а) средняя норма стока для гидрологического района Y_{0p} :

$$Y_{0p} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n F_i Y_{0i}, \quad (5.1)$$

где $F = \sum_{i=1}^n F_i$ – площадь гидрологического района;

F_i – частные водосборы или фрагменты карты между изолиниями стока в границах гидрологического района;

б) средний градиент стока $\text{grad } Y$:

$$\text{grad} Y_p = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_{i+1} - Y_i| F_i}{l_i}, \quad (5.2)$$

где l_i – расстояние между центрами водосбора или изолиниями стока в направлении его градиента, если определения ведутся по карте;

Y_i – норма стока по i -той изолинии;

в) коэффициент вариации годового стока C_v ;

г) предельно малая (репрезентативная) площадь водосбора F_m ;

д) нормированная корреляционная функция для годового стока рек $r(l)$, где l – расстояние между центрами водосборов;

е) относительная случайная погрешность определения годового стока по гидрометрическим данным σ .

Для того чтобы была учтена физическая основа гидрологических процессов при аналитическом представлении полей элементов стока, по методике ГГИ предполагается определять исходные данные на базе гидрологического районирования. Гидрологическое районирование устанавливает однородные районы по физико-географическим и гидрологическим условиям, в пределах которых возможно правильное обобщение основных характеристик режима и распространение их на неизученные водные объекты по методу гидрологических аналогий.

Метод ГГИ применим к полю стока. При наличии малого числа рядов наблюдений за стоком по бассейну, для которого рассчитывается оптимальная численность постов, метод не будет работать.

Метод ГГИ основан на вычислении трех критериев оптимальной численности постов наблюдений. Критерий репрезентативности $F_{\text{репр}}$ – первое и обязательное условие для размещения сети. Его соблюдение (т. е. при меньшем его значении относительно оптимальной площади, приходящейся на один стоквой пост) дает возможность получить зональные характеристики стока. Градиентный критерий характеризует надежность информации о пространственных изменениях нормы стока. Он служит для того, чтобы выявить наблюдениями на станциях изменения нормы стока. Верхний предел оптимальной площади водосбора выражает корреляционный критерий. Превышение этого критерия приводит к потере корреляции стока между бассейнами.

Градиентный критерий

Изменение нормы стока, определенное для центров двух бассейнов, должно превышать в 2 раза среднеквадратическую погрешность расчета этого изменения, определяемую по данным измерения на двух смежных опорных постах:

$$\Delta Y(l) = l \text{ grad } Y \geq 2\sigma_{\Delta Y} = 2\sqrt{2} \sigma_0 Y_{\text{ср}}, \quad (5.3)$$

где $\sigma_0 = C_v / \sqrt{N}$ – погрешность определения нормы стока;

N – число лет наблюдений;

$Y_{\text{ср}}$ – средняя на участке радиусом l норма стока.

Расстояние между центрами бассейнов, замыкаемыми опорными постами, должно отвечать неравенству

$$l_{\text{град}} \geq \frac{2.82 \sigma_0}{\text{grad } Y} Y_{\text{ср}}. \quad (5.4)$$

Для определения расчетной площади, приходящейся на один стоковой пост, используются эмпирические соотношения:

$$L = 2\sqrt{F}, \quad l = 0,5 L, \quad (5.5)$$

где L – длина реки;

F – площадь бассейна;

l – расстояние между центрами бассейнов.

Получается формула для расчета градиентного критерия, который выражает минимальный размер водосбора, при котором наблюдениями на опорных постах выявляются изменения нормы стока, обусловленные географической зональностью или высотной поясностью климатических факторов (например, в горных районах сеть постов должна быть гуще, так как градиент стока больше по сравнению с равнинной местностью), а также уровнем развития гидрометрического оборудования (σ_0) [46]:

$$F_{\text{град}} \geq \frac{8 \sigma_0^2}{(\text{grad } Y)^2} Y_{\text{ср}}^2. \quad (5.6)$$

Итак, для расчета градиентного критерия требуются усредненные для района характеристики: средняя норма стока и градиент стока. Эти характеристики находились с помощью компьютерного приложения *Surfer*.

Алгоритм расчета показан на рисунке 5.1.

Градиент в программном пакете *Surfer 7.0* рассчитывается по следующему уравнению [47]:

$$\|\vec{g}\| = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}, \quad (5.7)$$

где $\partial z/\partial x$, $\partial z/\partial y$ – приращение величины, для которой вычисляется градиент, по координатам x и y соответственно.

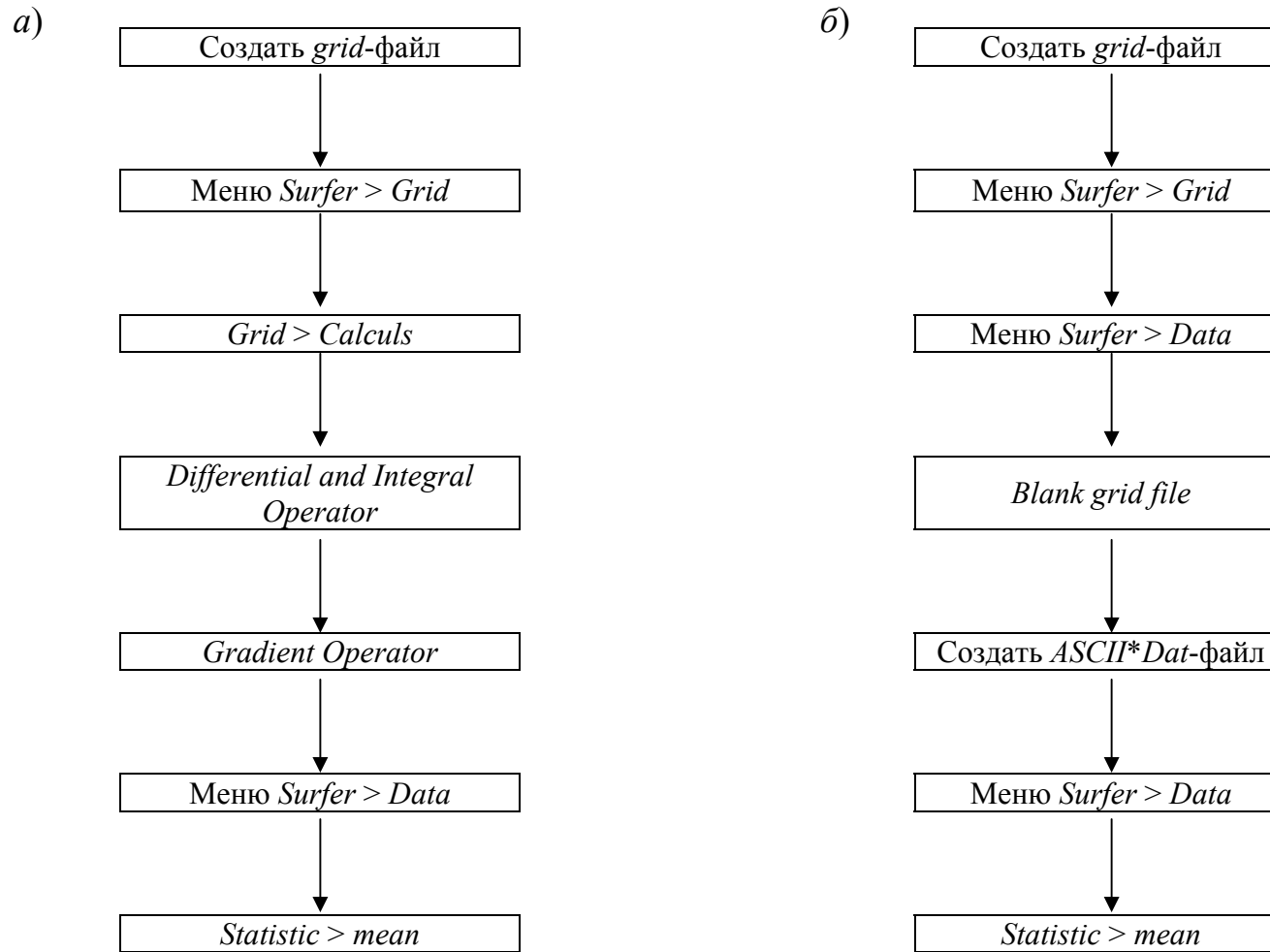


Рисунок 5.1 – Алгоритм определения градиента стока в *Surfer* (a), алгоритм построения *grid*-файла для модуля стока в *Surfer* (б).

В свою очередь изменения величины z по координатам вычисляются по следующим формулам:

$$\frac{dz}{dx} = \frac{Z_E - Z_W}{2\Delta x}; \quad (5.8)$$

$$\frac{dz}{dy} = \frac{Z_N - Z_S}{2\Delta y}, \quad (5.9)$$

где Z_E, Z_W, Z_N, Z_S – интерполированные (методом Кригинга) значения между известными величинами Z и берутся из *Grid* файла, который можно интерпретировать, как сетку, состоящую из ячеек:

$$\begin{array}{cccccc}
 & & & Z_{NN} & & \\
 & & & \bullet & & \\
 & & Z_{NW} & Z_N & Z_{NE} & \\
 & & \bullet & \bullet & \bullet & \\
 Z_{WW} & Z_W & Z & Z_E & Z_{EE} & \\
 \bullet & \bullet & \circ & \bullet & \bullet & \\
 & Z_{SW} & Z_S & Z_{SE} & & \\
 & \bullet & \bullet & \bullet & & \\
 & & Z_{SS} & & & \\
 & & \bullet & & &
 \end{array} \quad (5.10)$$

Таким образом, градиент рассчитывается по формуле:

$$\|\bar{g}\| = \sqrt{\left(\frac{Z_E - Z_W}{2\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{Z_N - Z_S}{2\Delta y}\right)^2}. \quad (5.11)$$

По рассчитанным значениям была построена карта, представленная на рисунке 5.2. Видно, что градиент в Западной Африке гораздо больше, чем в Южной, из-за этого получается завышенное среднее значение для всей территории, что сказалось на определении градиентного критерия (см.

таблицу 5.1). Также был рассчитан градиентный критерий отдельно для Западной и Южной Африки, результаты представлены в таблице 5.1.

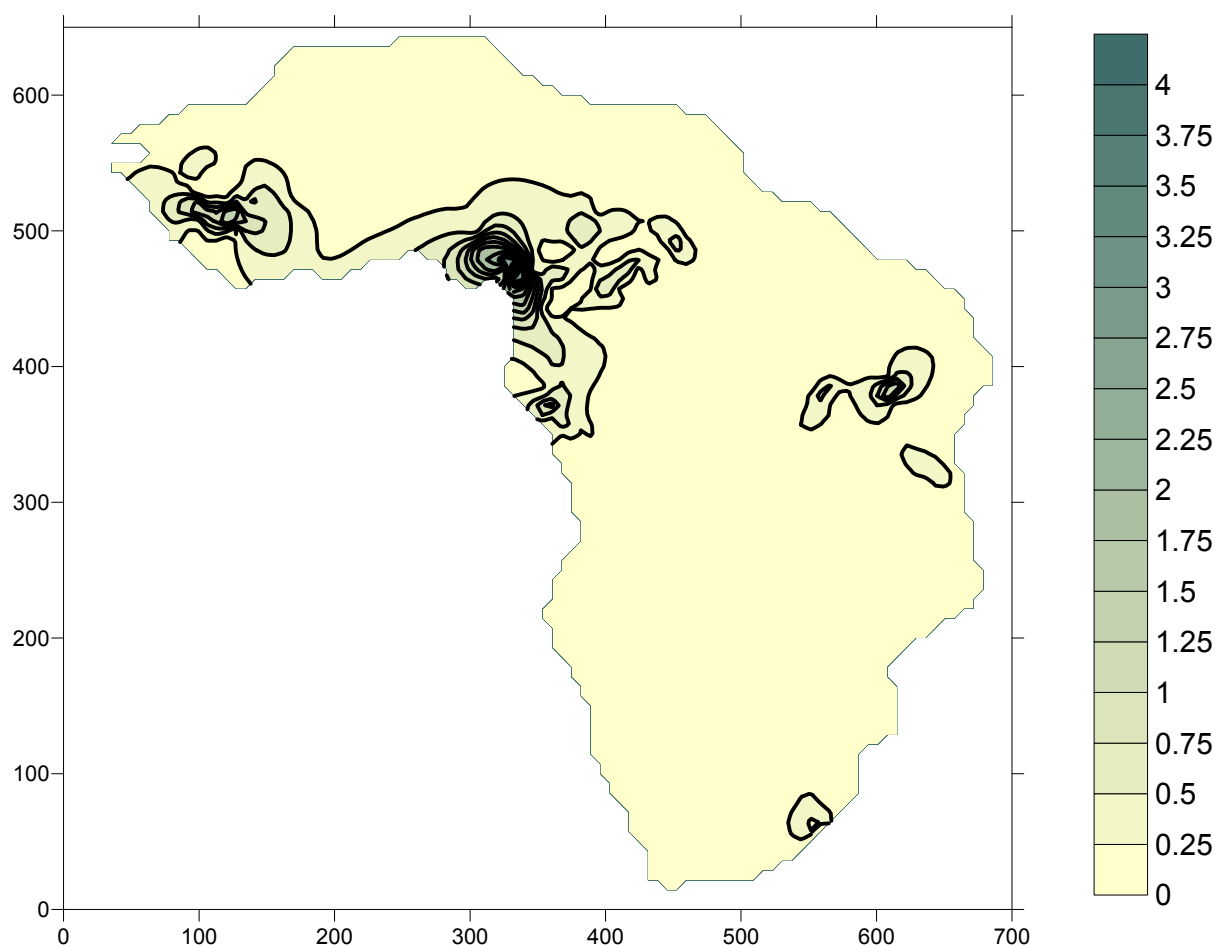


Рисунок 5.2 – Градиент стока.

Таблица 5.1 – Расчет градиентного критерия

Территория	σ_0	$Y_{\text{ср}}$, л/с км ²	grad Y , (л/с км ²)/км ²	$F_{\text{град}}$, км ²
Юго-Западная Африка	0,044	7,50	0,108	65
Южная Африка	0,097	4,63	0,0085	4823
Западная Африка	0,041	17,1	0,07	804

Корреляционный критерий

При расчетах стока широко используется метод гидрологической аналогии, когда режим водного объекта, для которого нет данных система-

тических наблюдений за стоком воды, изучается с помощью реки-аналога. Это справедливо для несильно удаленных друг от друга речных бассейнов, характеризующихся сходными гидрометеорологическими и гидрогеологическими условиями формирования стока. Превышение корреляционного критерия приводит к потере корреляции стока между бассейнами.

Вывод неравенства для корреляционного критерия основывается на логических обоснованиях погрешности измерений и интерполяции, а также на некоторых эмпирических уравнениях [46]. В итоге предлагается следующий вид критериального неравенства:

$$F_{\text{кор}} \leq \frac{\sigma_0^4}{a^2 C_v^4}, \quad (5.12)$$

где $a = 1/L_0$;

L_0 – радиус корреляции – расстояние, при котором корреляционная функция $r(l)$ переходит через нуль.

Радиус корреляции стока L_0 находился путем аппроксимации корреляционных функций рядов стока. Координаты корреляционной функции: по оси X – расстояние между центрами водосборов постов, по оси Y – коэффициент корреляции между рядами наблюдений за стоком тех же рек. С целью автоматизации расчетов, расстояния от одного центра ко всем другим центрам водосборов вычисляются по географическим координатам с помощью теоремы Пифагора. Общий вид расчетной формулы имеет вид:

$$L_e = \sqrt{((\text{long}1 - \text{long}2)A)^2 + ((\text{lat}1 - \text{lat}2)B)^2}, \quad (5.13)$$

где $\text{long}1$ и $\text{long}2$ – координаты долготы двух каких-либо центров водосборов;

$\text{lat}1$ и $\text{lat}2$ – координаты широты тех же центров;

A – изменяющийся коэффициент по широте, показывающий количество километров в минуте (км/мин);

B – постоянный коэффициент по долготе, равный для используемого масштаба (1:4 000 000) 1,867 км/мин.

Чтобы избежать отрицательных значений при аппроксимации корреляционной функции экспоненциальной кривой, данные были усреднены на интервале по $\Delta L = 100$ км. Таким образом, получена аппроксимирующая экспоненциальная кривая по средним значениям коэффициентов парной корреляции для каждой градации расстояний.

В работе И. Ф. Карасева [46] отмечено, что для близко расположенных бассейнов рек одного гидрологического района корреляционная функция может быть аппроксимирована линейной зависимостью. Таким образом, можно получить два варианта значений радиуса корреляции и рассчитать по ним корреляционные критерии. Результаты представлены в таблице 5.2.

На рисунках 5.3, 5.4 показаны варианты аппроксимации корреляционной функции.

В Приложении В показан фрагмент корреляционной матрицы.

Таблица 5.2 – Расчет корреляционного критерия

Территория	σ_0	L_0 , км	a , км	Cv	$F_{кор}$
при линейной аппроксимации					
Юго-Западная Африка	0,044	4102	0,00024	0,47	1292
при аппроксимации экспоненциальной зависимостью					
Юго-Западная Африка	0,044	2300	0,00043	0,47	406

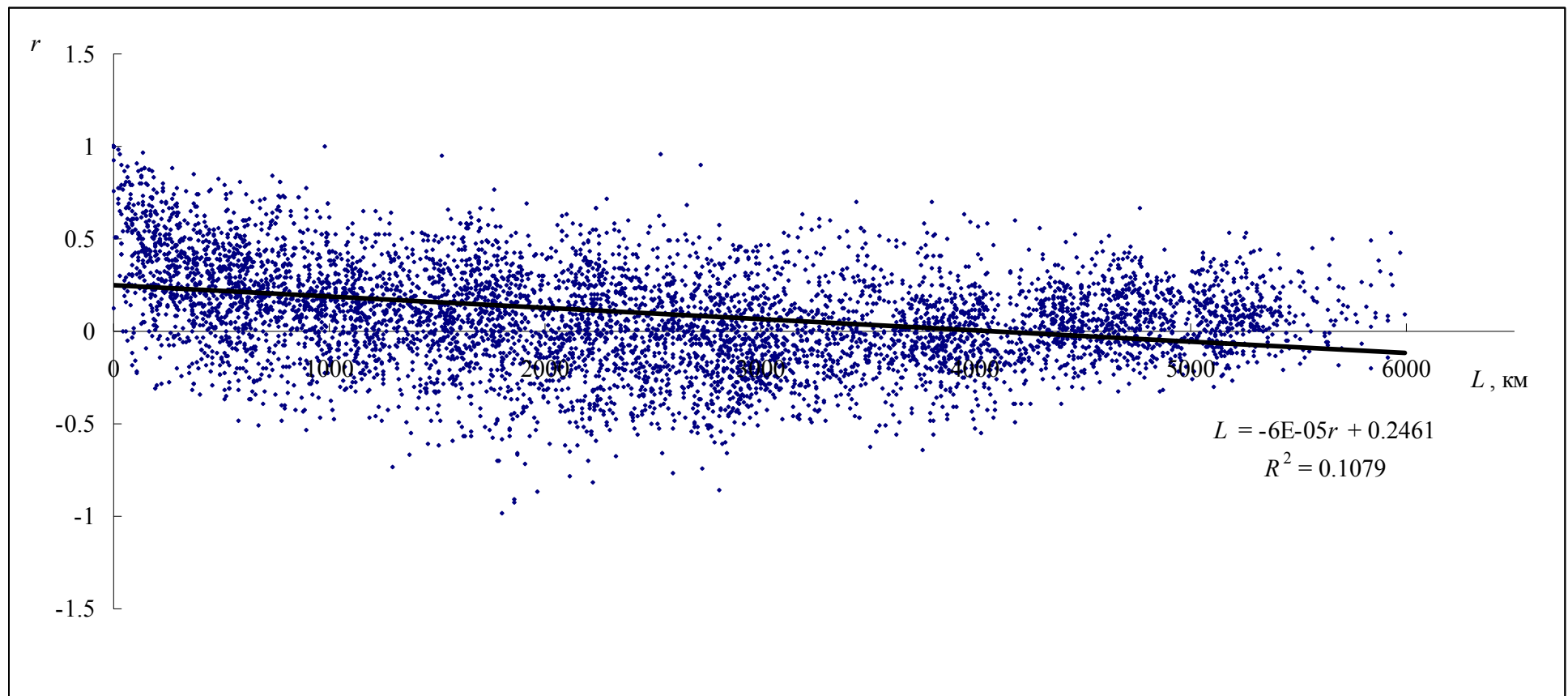


Рисунок 5.3 – Корреляционная функция с линейной зависимостью.

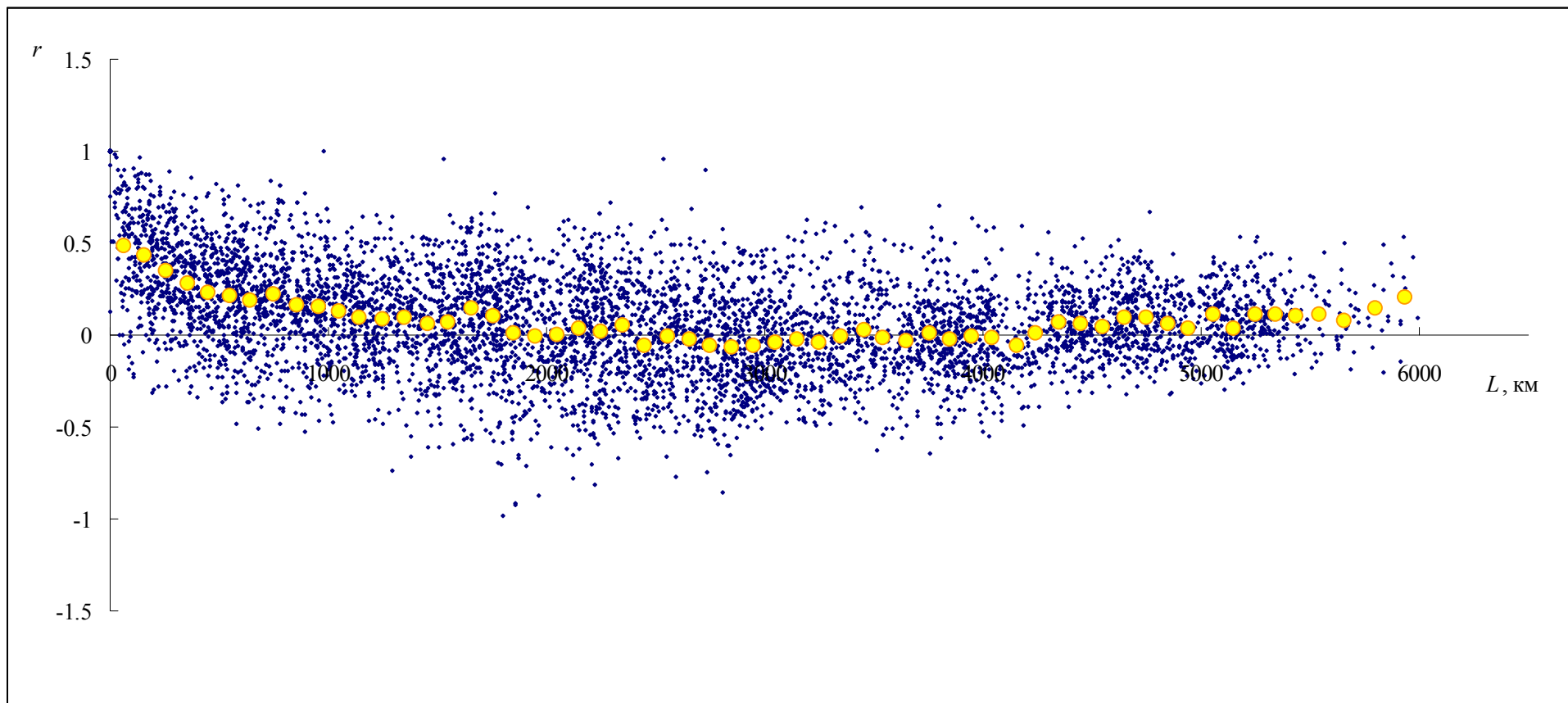


Рисунок 5.4 – Корреляционная функция с экспоненциальной зависимостью.

Репрезентативный критерий

Площадь, приходящаяся на один стоковый пост, не должна быть очень малой, иначе информация, получаемая с него, будет отражать не общие зональные закономерности стока, а местные особенности, т. е. не будет репрезентативной. Следовательно, без соблюдения критерия репрезентативности $F_{\text{репр}}$, нельзя получить зональные характеристики стока. Зональная норма стока не зависит от размера бассейна, если его площадь больше $F_{\text{репр}}$.

Для нахождения репрезентативного критерия строились графики зависимости модуля стока от площади водосбора ($q = f(F)$ – редуционные кривые). На графиках (рисунок 5.5) можно наблюдать изменения модуля стока с увеличением площади водосбора. В зоне от 0 до $F_{\text{репр}}$ модуль стока может увеличиваться или уменьшаться с ростом площади водосбора реки. Характер его изменения определяется местными условиями формирования стока. Значение $F_{\text{репр}}$ зависит в основном от глубины залегания подземных вод: чем ближе к поверхности подземные воды, тем значение $F_{\text{репр}}$ будет меньше, поскольку тем скорее река сможет дренировать все питающие ее водоносные горизонты.

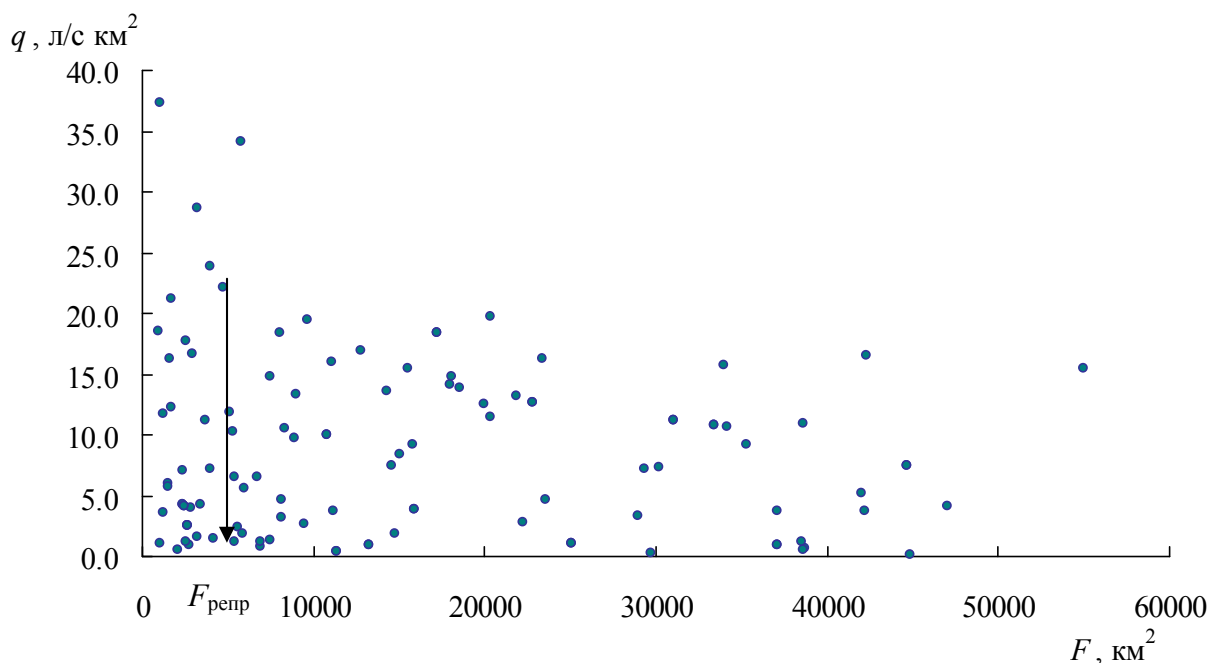


Рисунок 5.5 – Редуционная зависимость.

Редукционная зависимость строилась по 141 станциям, расположенным на территории Юго-Западной Африки. Использовались станции, которые имеют продолжительные ряды без пропусков и различные площади водосборов, включая азональные.

По данным К. П. Воскресенского, для лесной зоны азиатской территории бывшего СССР $F_{\text{репр}} \approx 500 \text{ км}^2$, а для степной – 1500 км^2 [48].

Репрезентативная площадь определялась по специально разработанной методике, в основе которой лежит критерий оценки однородности Стьюдента и/или Фишера. Соответствующие значения ряда (площадь водосбора F и модуль стока q) ранжировались по возрастанию площади, и значения q представлялись как бы в «хронологическом» порядке; таким образом, стало возможным применение критерия однородности Стьюдента и/или Фишера.

Однородность проверялась на 5 % уровне значимости. Такой уровень значимости интерпретируется следующим образом: «возможна значимость. Есть некоторые сомнения в истинности нулевой гипотезы» [37]. В результате вычисления (определения) репрезентативной площади получено, что ряды однородны по Фишеру и по Студенту до $N_1/N_2 \approx 11/130$ и после $N_1/N_2 \approx 133/09$, где N_1 и N_2 показывают деление ряда с соответствующими продолжительностями. Таким образом, определено, что 650 км^2 является репрезентативной площадью для Юго-Западной Африки. Между значениями 650 и $40\,000 \text{ км}^2$ (полизональные бассейны) влияют зональные факторы на формирования стока. Были также определены еще значения, при которых критерий Стьюдента и Фишера больше критических значений: $N_1/N_2 \approx 34/107$, $67/74$, $123/18$, и соответствующие площади $F \approx 1585$, 2000 , 5540 и 28900 км^2 , но данные численные значения критериев меньше, чем для рассмотренных выше площадей.

Оптимальное число постов

Оптимальная площадь $F_{\text{опт}}$, приходящаяся на один режимный пост, должна находиться в диапазоне

$$F_{\text{репр}} < F_{\text{град}} \leq F_{\text{опт}} \leq F_{\text{кор}}. \quad (5.14)$$

Если данное соотношение между критериями нарушено, то по методу ГГИ рекомендуется использовать следующие соотношения [46]:

$$\begin{aligned} &\text{при } F_{\text{репр}} < F_{\text{кор}} < F_{\text{град}} \text{ принимается } F_{\text{кор}} < F_{\text{опт}} < F_{\text{град}}; \\ &\text{при } F_{\text{кор}}, F_{\text{град}} < F_{\text{репр}} \text{ назначаем } F_{\text{репр}} < F_{\text{опт}}. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Общее число режимных стоковых постов в речном бассейне площадью F определяется формулой

$$N_{\text{опт}} = F / F_{\text{опт}}. \quad (5.16)$$

Нарушение приведенной выше цепочки неравенств приводит к тому, что сеть постов не будет оптимальной при заданном уровне погрешности σ_0 . При его нарушении (но при соблюдении неравенства $F_{\text{репр}} \leq F_{\text{опт}}$) либо вычисление нормы стока, либо интерполяция будут проводиться с большими погрешностями. Когда $F_{\text{кор}} < F_{\text{град}}$, то целесообразно исходить из градиентного критерия $F_{\text{град}}$, но тогда ошибка корреляции может превысить погрешность измерения [49].

Таблица 5.3 – Результирующая таблица по критериям оптимизации

Территория	Репрезентативный критерий $F_{\text{репр}}, \text{ км}^2$	Корреляционный критерий $F_{\text{кор}}, \text{ км}^2$	Градиентный критерий $F_{\text{град}}, \text{ км}^2$
Юго-Западная Африка	650	406	65
Южная Африка	2500	5626	4823
Западная Африка	1680	846	804

Получено, что для Юго-Западной Африки градиентный критерий меньше корреляционного критерия и оба меньше репрезентативного критерия, значит, оптимальная площадь назначается из условия, что репрезентативный критерий должен быть меньше оптимальной площади: $F_{\text{опт}} = 650 \text{ км}^2$.

В таблице 5.4 показаны варианты общего числа постов с учетом полученных критериев и максимально возможной зональной площади. Самый оптимальный результат – это 387 постов для Юго-Западной Африки. Подобные таблицы отдельно для Южной и Западной Африки представлены в Приложении Г.

В таблице 5.5 показаны прогнозные значения градиентного критерия и оптимальной площади (по сценарию Commit) при постоянных значениях корреляционного и репрезентативного критериев. Варианты общего числа постов с учетом полученных критериев по климатическому сценарию Commit показаны в Приложении Г.

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.

Таблица 5.4 – Оптимальная площадь и оптимальное число постов для Юго-Западной Африки

Река	Станция	$F(\text{км}^2)$	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 2000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 5000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 10000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 20000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 30000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 40000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 50000
MILO	KONSANKORO	1000	1	0	0	0	0	0	0
TINKISSO	DABOLA	1260	1	0	0	0	0	0	0
NIGER	FARANAH	3180	2	1	0	0	0	0	0
MILO	KANKAN	9620	5	2	1	0	0	0	0
NIANDAN	BARO	12770	6	3	1	1	0	0	0
NIGER	KOUROUSSA	18000	9	4	2	1	1	0	0
SANKARANI	MANDIANA	21900	11	4	2	1	1	1	0
IRANE	KOUTAKOUKROU	1250	1	0	0	0	0	0	0
ALIBORI	ROUTE KANDI- BANIKOARA AMONT	8170	4	2	1	0	0	0	0
ALIBORI	ROUTE KANDI- BANIKOARA AVAL	8170	4	2	1	0	0	0	0
PENDJARI	PORGA	22280	11	4	2	1	1	1	0
OUEME	PONT DE SAVE	23600	12	5	2	1	1	1	0
OUEME	BONOU	46990	23	9	5	2	2	1	1
BAGOE	TOMBOUGOU 1	2580	1	1	0	0	0	0	0
TANO	ALANDA	15800	8	3	2	1	1	0	0
FALEME	GOURBASSY	15000	8	3	2	1	1	0	0
BAFING (TRIB. ATUI	DAKA SAYDOU	15500	8	3	2	1	1	0	0
SANKARANI	SELINGUE	34200	17	7	3	2	1	1	1
SANKARANI	GOUALA	35300	18	7	4	2	1	1	1
KOULOUNTOU	GUE DU P.N.N.K.	5350	3	1	1	0	0	0	0
GAMBIA	GOULOUMBOU	42000	21	8	4	2	1	1	1
BLACK VOLTA	BANZO	2816	1	1	0	0	0	0	0
COMOE	DIARABAKOKO	2350	1	0	0	0	0	0	0
LERABA	YENDERE	5930	3	1	1	0	0	0	0
COMOE	FOLONZO	9480	5	2	1	0	0	0	0
BLACK VOLTA	NWOKUY	14800	7	3	1	1	0	0	0

Продолжение таблицы 5.4

Река	Станция	$F(\text{км}^2)$	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 2000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 5000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 10000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 20000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 30000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 40000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 50000
BLACK VOLTA	BOROMO	37140	19	7	4	2	1	1	1
COMOE	DIARABAKOKO	2350	1	0	0	0	0	0	0
BLACK VOLTA	BOROMO	37140	19	7	4	2	1	1	1
DARGOL	TERA	2750	1	1	0	0	0	0	0
MARADI	MADAROUNFA	5400	3	1	1	0	0	0	0
DARGOL	KAKASSI	6940	3	1	1	0	0	0	0
GAROUOL	DOLBEL	7500	4	2	1	0	0	0	0
SIRBA	GARBE-KOUROU	38750	19	8	4	2	1	1	1
GOROUOL	ALCONGUI	44900	22	9	4	2	1	1	1
TSANAGA	BOGO	1535	1	0	0	0	0	0	0
BINI	BEREM	1585	1	0	0	0	0	0	0
VINA	LAHORE	1690	1	0	0	0	0	0	0
NDJEKE	NGONGON	3720	2	1	0	0	0	0	0
MAPE	MAGBA	4020	2	1	0	0	0	0	0
NOUN	BAFOUSSAM	4700	2	1	0	0	0	0	0
DJA	SOMALOMO	5150	3	1	1	0	0	0	0
NYONG	AYOS	5300	3	1	1	0	0	0	0
CROSS	MAMFE	6810	3	1	1	0	0	0	0
MBERE	MBERE	7430	4	1	1	0	0	0	0
NYONG	AKONOLINGA	8350	4	2	1	0	0	0	0
KADEI	BATOURI	8970	4	2	1	0	0	0	0
LOM	BETARE-OYA	11100	6	2	1	1	0	0	0
NYONG	KAYA	19985	10	4	2	1	1	0	0
NTEM	NGOAZIK	18100	9	4	2	1	1	0	0
NYONG	OLAMA	18510	9	4	2	1	1	0	0
KADEI	PANA	20370	10	4	2	1	1	1	0
DJEREM	MBAKAOU	20390	10	4	2	1	1	1	0
MBAM	GOURA	42300	21	8	4	2	1	1	1
LOGONE	MOUNDOU	33970	17	7	3	2	1	1	1

Продолжение таблицы 5.4

Река	Станция	$F(\text{км}^2)$	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 2000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 5000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 10000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 20000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 30000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 40000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 50000
KABIA	PONT CAROL	2072	1	0	0	0	0	0	0
MATLABAS	HAARLEM EAST	1054	1	0	0	0	0	0	0
MOOIRIVIER (TRIB. TUGELA)	DOORNKLOOF	1546	1	0	0	0	0	0	0
MKOMAZI	LOT93.1821 CAMDEN	1744	1	0	0	0	0	0	0
KEISKAMMA	FARM 7	2530	1	1	0	0	0	0	0
OLIFANTS	WOLWEKRANS	3256	2	1	0	0	0	0	0
KLIP	DELANGESDRIFT	4152	2	1	0	0	0	0	0
INCOMATI	HOOGGENOEG	5540	3	1	1	0	0	0	0
DORING	ELANDS DRIFT	6895	3	1	1	0	0	0	0
TUGELA	MANDINI	28920	14	6	3	1	1	1	1
GROOT-VIS	MATOLEMA'S LOCATION OUTSPAN	29745	15	6	3	1	1	1	1
ORANGE	ALIWAL NOORD	37070	19	7	4	2	1	1	1
VAAL	ELANDSFONTEIN ENGELBRECHTSDRIFT	38564	19	8	4	2	1	1	1
ODZI	ODZI BRIDGE	2498	1	0	0	0	0	0	0
MUNYATI	DYKE G/W	2662	1	1	0	0	0	0	0
ODZI	ODZI BRIDGE	2498	1	0	0	0	0	0	0
MUNYATI	DYKE G/W	2662	1	1	0	0	0	0	0
ODZI	ODZI BRIDGE	2498	1	0	0	0	0	0	0
MUNYATI	DYKE G/W	2662	1	1	0	0	0	0	0
MACHEKE	CONDO U/S G/W	3383	2	1	0	0	0	0	0
UMNIATI	POWER STATION	5890	3	1	1	0	0	0	0
SAVE	CONDO D/S G/W	11174	6	2	1	1	0	0	0
GWAAI	KAMATIVI G/W	38600	19	8	4	2	1	1	1
GURUMETI	MUSOMA ROAD	13233	7	3	1	1	0	0	0
KILOMBERO	SWERO	33400	17	7	3	2	1	1	1
BUBU	BAHI	11400	6	2	1	1	0	0	0

Продолжение таблицы 5.4

Река	Станция	$F(\text{км}^2)$	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 2000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 5000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 10000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 20000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 30000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 40000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 50000
PANGANI	KOROGWE	25110	13	5	3	1	1	1	1
RUVU	MOROGORO ROAD	15916	8	3	2	1	1	0	0
NYABARONGO	KIGALI	8900	4	2	1	0	0	0	0
NYABARONGO	KANZENZE	14600	7	3	1	1	0	0	0
KAGERA	RUSUMO	30200	15	6	3	2	1	1	1
GURUMETI	MUSOMA ROAD	13233	7	3	1	1	0	0	0
NIARI	KAYES	17190	9	3	2	1	1	0	0
KILOMBERO	SWERO	33400	17	7	3	2	1	1	1
BUBU	BAHI	11400	6	2	1	1	0	0	0
PANGANI	KOROGWE	25110	13	5	3	1	1	1	1
RUVU	MOROGORO ROAD	15916	8	3	2	1	1	0	0
NYANGA	DONGUILA	5800	3	1	1	0	0	0	0
NIARI	KAYES	17190	9	3	2	1	1	0	0
KOUILOU	SOUNDA	55010	28	11	6	3	2	1	1
NIARI	LOUDIMA	23385	12	5	2	1	1	1	0
LOUDIMA	IFAC	3990	2	1	0	0	0	0	0
OUHAM	BOSSANGOA	22800	11	5	2	1	1	1	0
FOULAKARY	KIMPANZOU	2980	1	1	0	0	0	0	0
OUHAM	BATANGAFO	44700	22	9	4	2	1	1	1
LOBAYE	M'BATA	31000	16	6	3	2	1	1	1
MPOKO	BOSSELE-BALI	10800	5	2	1	1	0	0	0
DJA	NGBALA	38600	19	8	4	2	1	1	1
SEMLIKI	BWERAMULE	8000	4	2	1	0	0	0	0
RUSIZI	GATUMBA	14300	7	3	1	1	0	0	0
MUREMBWE	BASSE (MUTAMBARA)	949,6	0	0	0	0	0	0	0
OUHAM	BOSSANGOA	22800	11	5	2	1	1	1	0
FAFA	BOUCA	6750	3	1	1	0	0	0	0
OUHAM	BATANGAFO	44700	22	9	4	2	1	1	1
LOBAYE	M'BATA	31000	16	6	3	2	1	1	1

Продолжение таблицы 5.4

Река	Станция	$F(\text{км}^2)$	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 2000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 5000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 10000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 20000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 30000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 40000	$N/$ $F_{\text{опт}}$ 50000
МРОКО	BOSSELE-BALI	10800	5	2	1	1	0	0	0
ТОМИ	SIBUT	2380	1	0	0	0	0	0	0
МВОМОУ	ZEMIO	29300	15	6	3	1	1	1	1
TANA	GARISSA	42220	21	8	4	2	1	1	1
		сумм постов	891	356	178	89	59	45	36

Таблица 5.5 – Прогнозные значения оптимальной численности режимной сети для Южной и Западной Африки

Климатический сценарий	Репр. критерий $F_{\text{репр}}, \text{км}^2$	Корр. критерий $F_{\text{корр}}, \text{км}^2$	Град. критерий $F_{\text{град}}, \text{км}^2$	Опт. площадь $F_{\text{опт}}, \text{км}^2$
Западная Африка				
Commit	1680	4457	9880	$4457 < F_{\text{опт}} < 9880$
SRAB1	1680	4812	12829	$4812 < F_{\text{опт}} < 12829$
SRA2	1680	4958	16697	$4958 < F_{\text{опт}} < 16697$
SRA1B	1680	4238	7902	$4238 < F_{\text{опт}} < 7902$
Южная Африка				
Commit	2500	4822	15000	$4822 < F_{\text{опт}} < 15000$
SRAB1	2500	4513	19532	$4513 < F_{\text{опт}} < 19532$
SRA2	2500	4255	16235	$1255 < F_{\text{опт}} < 16000$
SRA1B	2500	4358	10778	$4358 < F_{\text{опт}} < 10778$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследований:

– Из имеющихся 114 фактических рядов наблюдений за гидрологическим режимом Юго-Западной Африки сформирована информационная база, состоящая из 104 рядов, позволяющая применить технологии оценки стоковых характеристик как существующего гидрологического режима, так и возможной его сценарной оценки для существующих климатических сценариев.

– 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.

– Выполнены долгосрочные сценарные оценки всех параметров, перечисленных выше, 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.

– 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.

Результаты диссертации опубликованы в работах [50–60].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Oyebande, L. Water problems in Africa – How Can the Sciences Help? [Текст] / L. Oyebande // Hydrological Sciences, 2001, № 6. – P. 947–962.
- 2 Global environment outlook 2000 [Текст].– London: UNEP/Earthscan Publ. Ltd., 1999.– 398 p.
- 3 Артамонов, И. Международные экономические организации африканских стран [Электронный ресурс] / И. Артамонов, А. Плотичина. – Мировая экономика, 2009–2014.– Режим доступа: <http://www.konspektov.net>
- 4 Географические карты стран мира [Электронный ресурс] / RSS, 2010–2012.– Режим доступа: <http://www.mapsmaps.ru/physicalmaps/physicmapafrica/fiz.-karta-afriki.html>
- 5 Страны Африки [Электронный ресурс], 2013.– Режим доступа: <http://bagazhznaniy.ru/obrazovanie/strany-afriki>
- 6 Фицджеральд, У. Африка [Текст] / У. Фицджеральд.– Москва: Изд-во иностранной литературы, 1987. – 696 с.
- 7 Гаррисон, Р.Дж. Западная Африка [Текст] / Р.Дж. Гаррисон.– Москва: Изд-во иностранной литературы, 1989.– 480 с.
- 8 Всемирная Метеорологическая Организация [Электронный ресурс] / 7bis av. la Paix, CP2300, CH-1211 Женева 2, Швейцария.– Режим доступа: <http://www.wmo.int/>
- 9 Галай, И.П. Физическая география материков и океанов [Текст] / И.П. Галай, В.А. Жучкевич, Г.Я. Рылюк.– Минск: Изд-во «Университетское», 1988. – 368 с.
- 10 The Egyptian International Center for Agriculture (EICA) [Электронный ресурс] / 5 Nadi El Seid Street, Dokki – Giza 239 Dokki – Giza Egypt, 2008.– Режим доступа: <http://tashkila.net/eica-eg.org/english.html>
- 11 Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона [Текст].– М.: Терра, 2001.– 40 726 с.

- 12 Дмитриевский, Ю.Д. Внутренние воды Африки и их использование [Текст] / Ю.Д. Дмитриевский.– Л. : Гидрометеиздат, 1967.– 382 с.
- 13 Эдельштейн, К.К. Структурная гидрология суши [Текст] / К.К. Эдельштейн.– М.: ГЕОС, 2005.– 316 с.
- 14 Дмитриевский, Ю.Д. Река Конго [Текст] / Ю.Д. Дмитриевский, И.Н. Олейников.– Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 150 с.
- 15 Олейников, И.Н. О водном режиме реки Конго и ее притоков. Сборнике: Страны и народы Востока [Текст] / И.Н. Олейников.– М.: Изд-во Науки, 1969.– 324 с.
- 16 The IPCC Assessment reports [Электронный ресурс] / IPCC.– 2009.– Режим доступа: <http://www.ipcc.ch>
- 17 Хансен, Дж. Опасное взаимодействие человека с климатом. Модельное исследование GISS [Текст] / Джеймс Хансен.– Атмос, 2006.
- 18 Janowiak, J.E. An investigation of interannual rainfall variability in Africa [Текст] / J.E. Janowiak.– Clim, 1998.– 240–255 p.
- 19 Nicholson, S.E. Recent rainfall fluctuations in Africa and their relationship to past conditions over the continent [Текст] / S.E. Nicholson.– The Holocene, 1994.– 121–131 p.
- 20 Birkett, C.Indian. Ocean climate event brings floods to East Africa's lakes and the Sudd Marsh [Текст] / C.Indian Birkett, R. Murtugudde, T. Allan. – Изд-во Geophys Res Lett, 1999.– 1031–1034 с.
- 21 Saji, N.H. Dipole mode in the tropical Indian Ocean [Текст] / N.H. Saji, B.N. Goswami, P.N. Vinayachandran, T.A. Yamagata.– Изд-во Nature 401, 1999.– 360–363 с.
- 22 Mike, Hulme. African climate change [Текст] / Hulme Mike, Ruth, Doherty, Todd Ngara, Mark New, David Lister, 2001.
- 23 Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации Том II. Последствия изменений климата [Текст] / Под рук. С.М. Семенова // Федеральная служба по гидрометеороло-

гии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет).– М.: Росгидромет, 2008.– 291 с.

24 Коваленко, В.В. Моделирование гидрологических процессов [Текст]: учебник.–Изд. 2-е, испр. и доп. / В.В. Коваленко, Н.В. Викторова, Е.В. Гайдукова.–СПб.: Изд. РГГМУ, 2006.–559 с.

25 Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате [Текст] / Под ред. В.В. Коваленко. – СПб.: изд. РГГМУ, 2010.– 50 с.

26 Коваленко, В.В. Гидрологическое обеспечение надежности строительных проектов при изменении климата [Текст] / В.В. Коваленко.– СПб.: изд. РГГМУ, 2009.– 100 с.

27 Коваленко, В.В. Частично инфинитное моделирование и прогнозирование процессов развития [Текст] / В.В. Коваленко.– СПб.: изд. РГГМУ, 1998.– 113 с.

28 Коваленко, В.В. Частично инфинитное моделирование: примеры, основания, парадоксы [Текст] / В.В. Коваленко.– СПб.: Политехника, 2005.– 486 с.

29 Коваленко, В.В. Частично инфинитный механизм турбулизации природных и социальных процессов [Текст] / В.В. Коваленко.– СПб.: изд. РГГМУ, 2006.– 166 с.

30 Куасси, Б.Г.А. Фрактальная диагностика годового стока Западной Африки [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 25.00.27: защищена 19.06.2008 / Куасси Би Гессан Арман.– СПб.: РГГМУ, 2008.–142 с.

31 Хамлили, А. Устойчивость моделей формирования многолетнего годового стока Северо-Западной Африки и долгосрочная оценка его статистических параметров при климатических изменениях [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 25.00.27: защищена 24.10.2011 / Абделатиф Хамлили.– СПб.: РГГМУ, 2011.– 157 с.

32 Григорьев, А. А. Глобальные природные ресурсы [Текст] / А.А. Григорьев, К.Я. Кондратьев // Бюллетень Использование и охрана природных ресурсов России.– 1999. №5–6.– С. 33–41.

33 Мировой водный баланс и водные ресурсы земли [Текст].– Л.: Гидрометеиздат, 1974.– 638 с.

34 Состояние мира 1999 [Текст].– М.: Изд-во «Весь Мир», 2000.– 364 с.

35 Эдельштейн, К. К. Гидрология материков [Текст]: Учеб. пособие для студ. Вузов / К. К. Эдельштейн. –М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.

36 Владимиров, А.М. Гидрологические расчеты [Текст] / А.М. Владимиров.– Л.: Гидрометеиздат, 1990.– 368 с.

37 Сикан, А.В. Статистические методы обработки гидрологической информации [Текст] / А.В. Сикан.– СПб.: изд. РГГМУ, 2007.– 279 с.

38 Коваленко, В.В. Обеспечение устойчивости моделирования и прогнозирования речного стока методами частично инфинитной гидрологии [Текст] / В.В. Коваленко.– СПб.: изд. РГГМУ, 2011.– 105 с.

39 Определение наилучшего метода интерполяции в пакете. Обработка спутниковой и космической информации // Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ) [Электронный ресурс] / Surfer 2014. – Режим доступа: <http://vunivere.ru/work22072>

40 Раткович, Д.Я. Многолетние колебания речного стока [Текст] / Д.Я. Раткович.– Л.: Гидрометеиздат, 1976.– 256 с.

41 The Intergovernmental Panel on Climate Change Data Distribution Centre – AR4 GCM data [Электронный ресурс] / ipcc, WMO, UNEP, 01 September 2013.– Режим доступа: http://www.ipcc-data.org/cgi-bin/ddc_nav/dataset=ar4_gcm

42 Георгиевский, Ю. М. Гидрологические прогнозы. [Текст] / Ю.М. Георгиевский, С.В. Шаночкин.– СПб.: изд-во РГГМУ, 2007.– 436 с.

43 Онтиверос М.М.А. Оптимизация численности режимной гидрологической сети Боливии с учетом перспективных изменений годового стока

[Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 25.00.27: защищена 16.06.2001 / Мольтинедо Мигель Анхель Онтиверос.– СПб.: РГГМУ, 2001.– 184 с.

44 Калинин, Г.П. Проблемы глобальной гидрологии [Текст] / Г.П. Калинин.– Л.: Гидрометеиздат, 1968.– 377 с.

45 Проблемы современной гидрологии. [Текст] // Сборник научных трудов гидрологического факультета.– СПб.: изд. РГГМУ, 2004.– 202 с.

46 Карасев, И.Ф. О принципах размещения и перспективах развития гидрологической сети [Текст] / И.Ф. Карасев // Труды ГГИ.– 1968.– Вып. 164.– С. 3 – 36.

47 Surfer 7.0//Surface Mapping System 7.0 [Электронный ресурс] /Golden Software Inc, 1997–2014. – Режим доступа: <http://www.goldensoftware.com>

48 Пространственно-временные колебания стока рек СССР [Текст] / Под. ред. А.В. Рождественского.– Л.: Гидрометеиздат, 1988.– 376 с.

49 Коваленко, В.В. Оптимизация режимной гидрологической сети на основе стохастической модели формирования речного стока [Текст] / В.В. Коваленко, И.И. Пивоварова.– СПб.: Изд. РГГМУ, 2000.– 43 с.

50 Бухарицин, П.И. Факторы, влияющие многолетнюю изменчивость составляющих мирового водного баланса [Текст] / П.И. Бухарицин, М. Куасси // Вестник Астраханского государственного технического университета, естественные технические науки, № 1, 2011. – С. 13–16.

51 Бухарицин, П.И. Водообеспеченность Африканского континента [Текст] / П.И. Бухарицин, М. Куасси // 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.

52 Бухарицин, П.И. Водохозяйственные проблемы центральной Африки в условиях неопределенности климатических изменений и антропогенных воздействий [Текст] / П.И. Бухарицин, М. Куасси // Вестник Астраханского государственного технического университета, естественные науки, естественные технические науки, № 1, 2012. – С. 37–40.

53 Гайдукова, Е. В. Оценка долгосрочных изменений вероятностных характеристик максимального стока [Текст] / Е.В. Гайдукова, В.А. Хаустов, А.А. Дехтярев, Е.Ю. Голованова, М. Куасси // Сборник материалов XVI Всероссийской научно-практической конференции «Стратегия устойчивого развития регионов России», Новосибирск, 2013. – С. 124–126.

54 Гайдукова, Е.В. Оценка гидрологических характеристик годового стока рек Юго-Западной Африки [Текст] / Е.В. Гайдукова, М. Куасси // Технические науки – от теории к практике, № 28, 2013. – С. 141–151.

55 Гайдукова, Е.В. Применение зависимости фрактальных размерностей рядов испарения от норм температуры приземного воздуха для устойчивого описания процесса формирования речного стока [Текст] / Е.В. Гайдукова, М. Куасси // Universum: технические науки, № 1(2), 2014. – С. 6–12.

56 Бухарицин, П.И. Оценка современного состояния водных ресурсов континентальных регионов земного шара [Текст] / П.И. Бухарицин, М. Куасси // Геология, география и глобальная энергия, № 1, 2011. – С. 121–132.

57 Куасси, М. Гидрологические характеристики многолетнего годового стока Юго-Западной Африки [Текст] / М. Куасси // Ученые записки РГГМУ, № 28, 2013. – С. 30–40.

58 Гайдукова, Е.В. Оптимизация режимной гидрологической сети в Юго-западной Африке [Текст] / Е.В. Гайдукова, М. Куасси // Труды Международной научно-практической конференции «Технические науки: тенденции, перспективы и технологии развития», 2014. – С. 69–72.

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

60 Коваленко, В.В. Устойчивость формирования вероятностного режима многолетнего речного стока в Арктическом регионе России [Текст] / В.В. Коваленко, Е.В. Гайдукова, М. Куасси // Ученые записки РГГМУ, № 36, 2014. – С. 7–12.

Приложение А – Карты прогнозных статистических характеристик речного стока на период от 2040 по 2069 гг. по различным климатическим сценариям

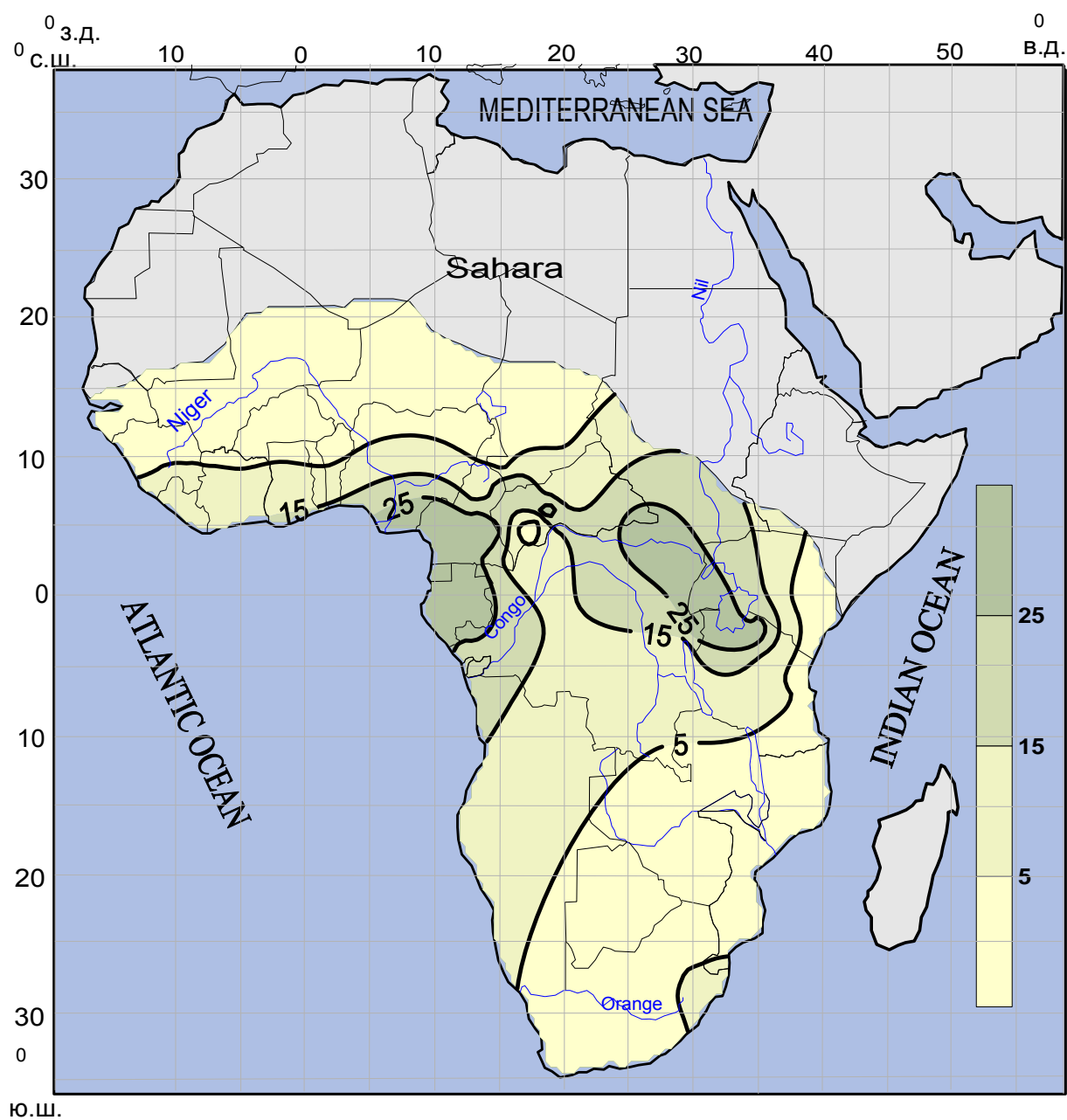


Рисунок А.1 – Прогнозные значения модуля стока (л/с·км²) по сценарию Commit.

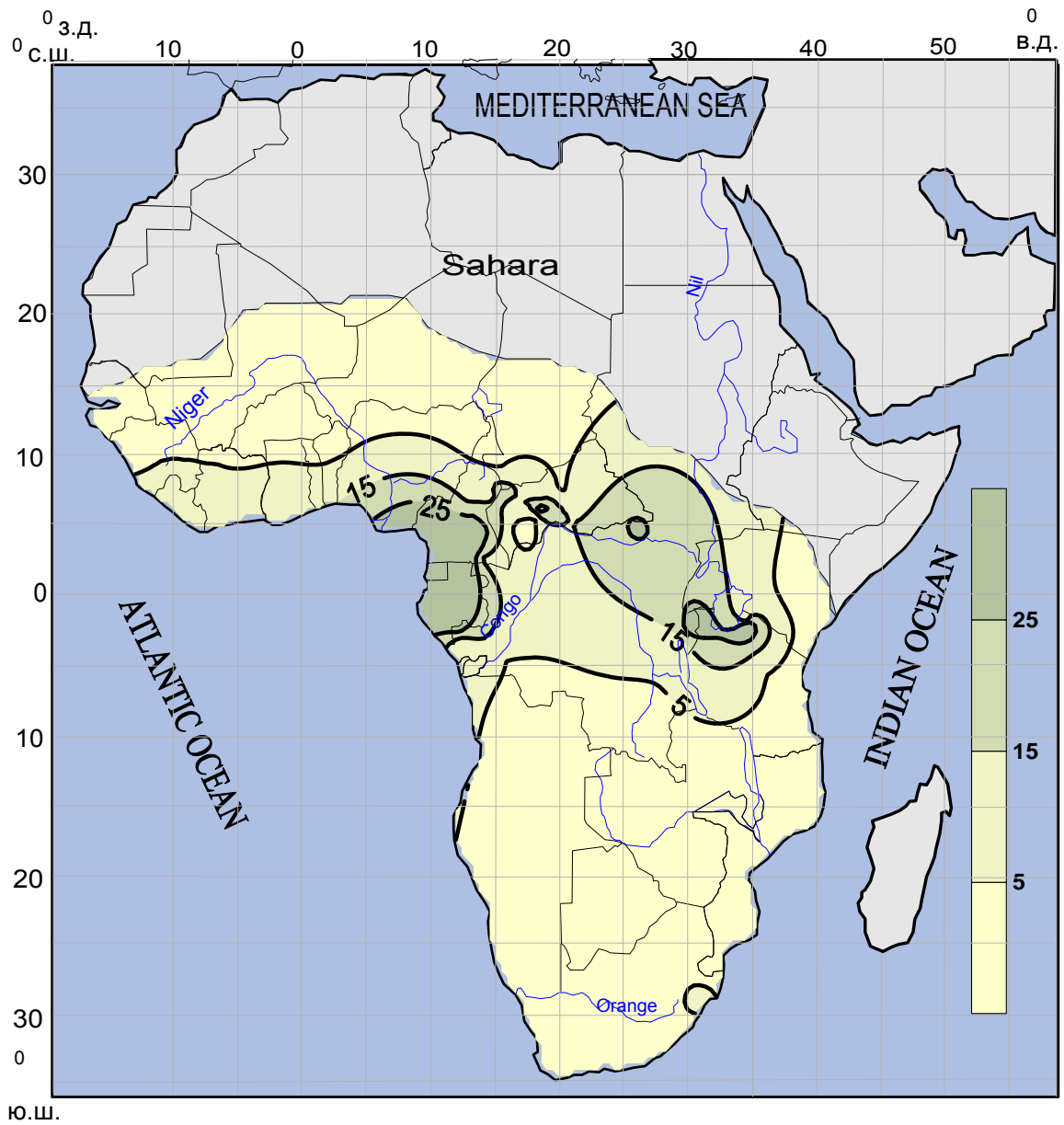


Рисунок А.2 – Прогнозные значения модуля стока (л/с·км²) по сценарию SRB1.

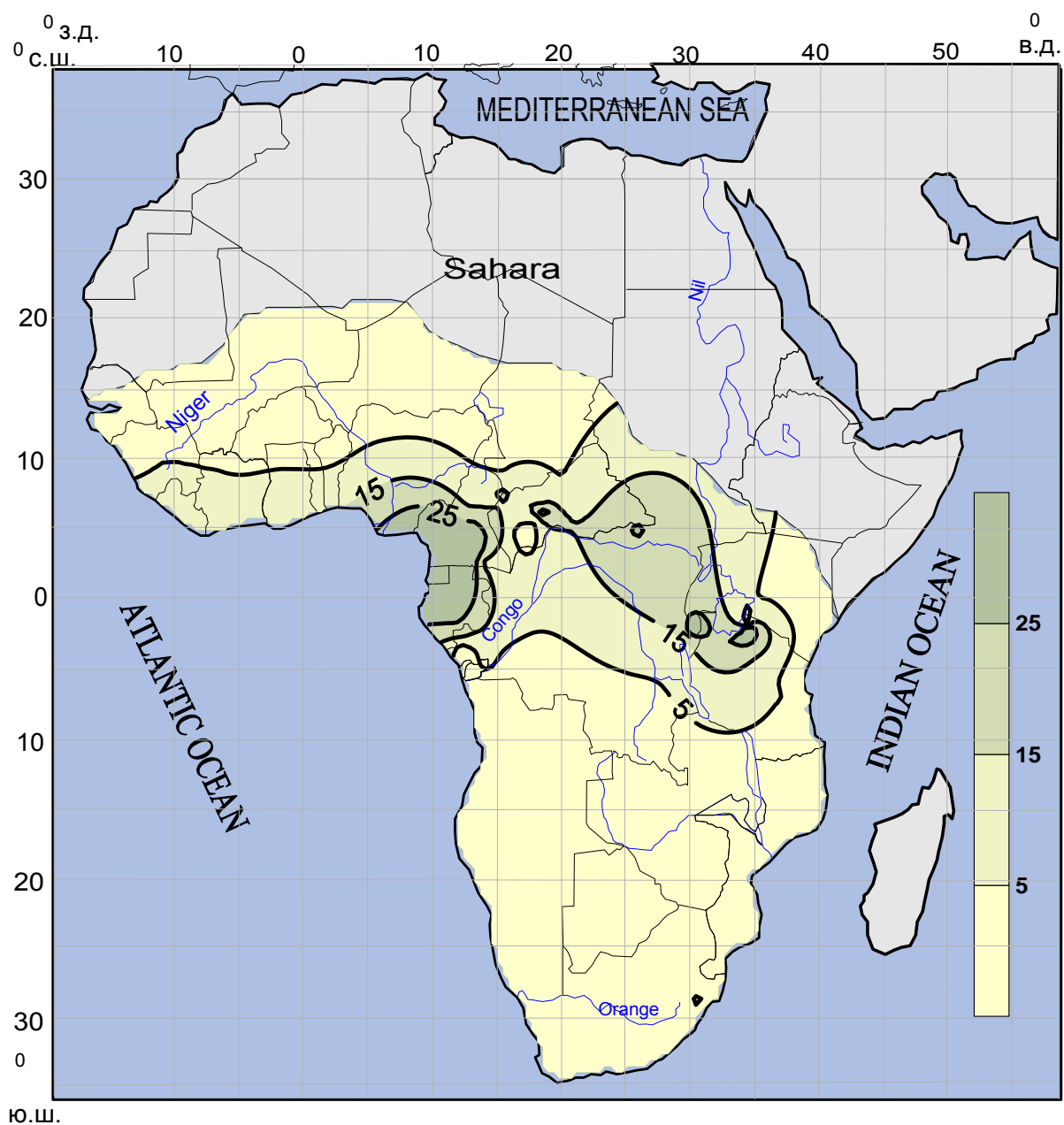


Рисунок А.3 – Прогнозные значения модуля стока (л/с·км²) по сценарию SRA2.

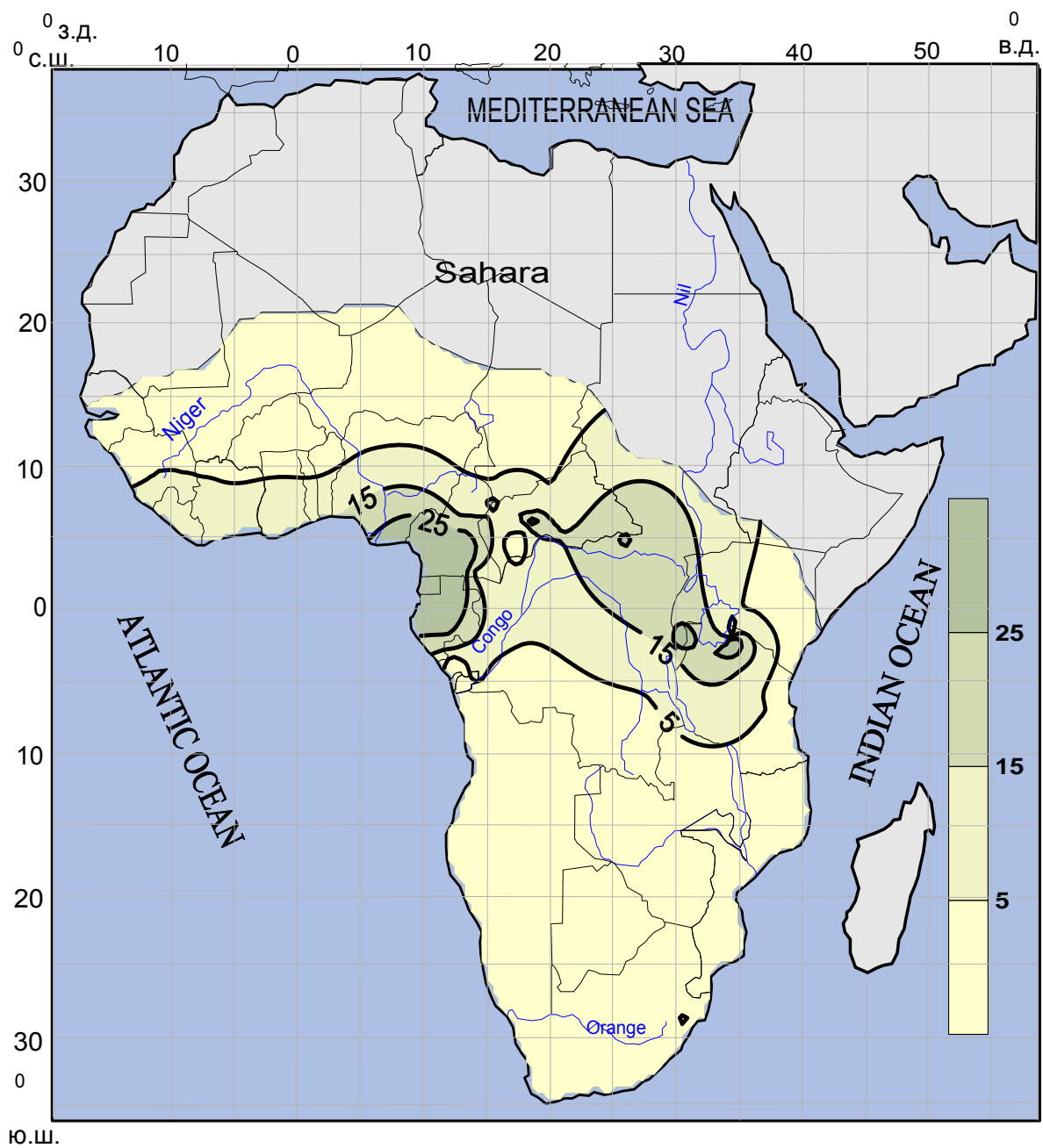


Рисунок А.4 – Прогнозные значения модуля стока ($л/с \cdot км^2$) по сценарию SRA1B.

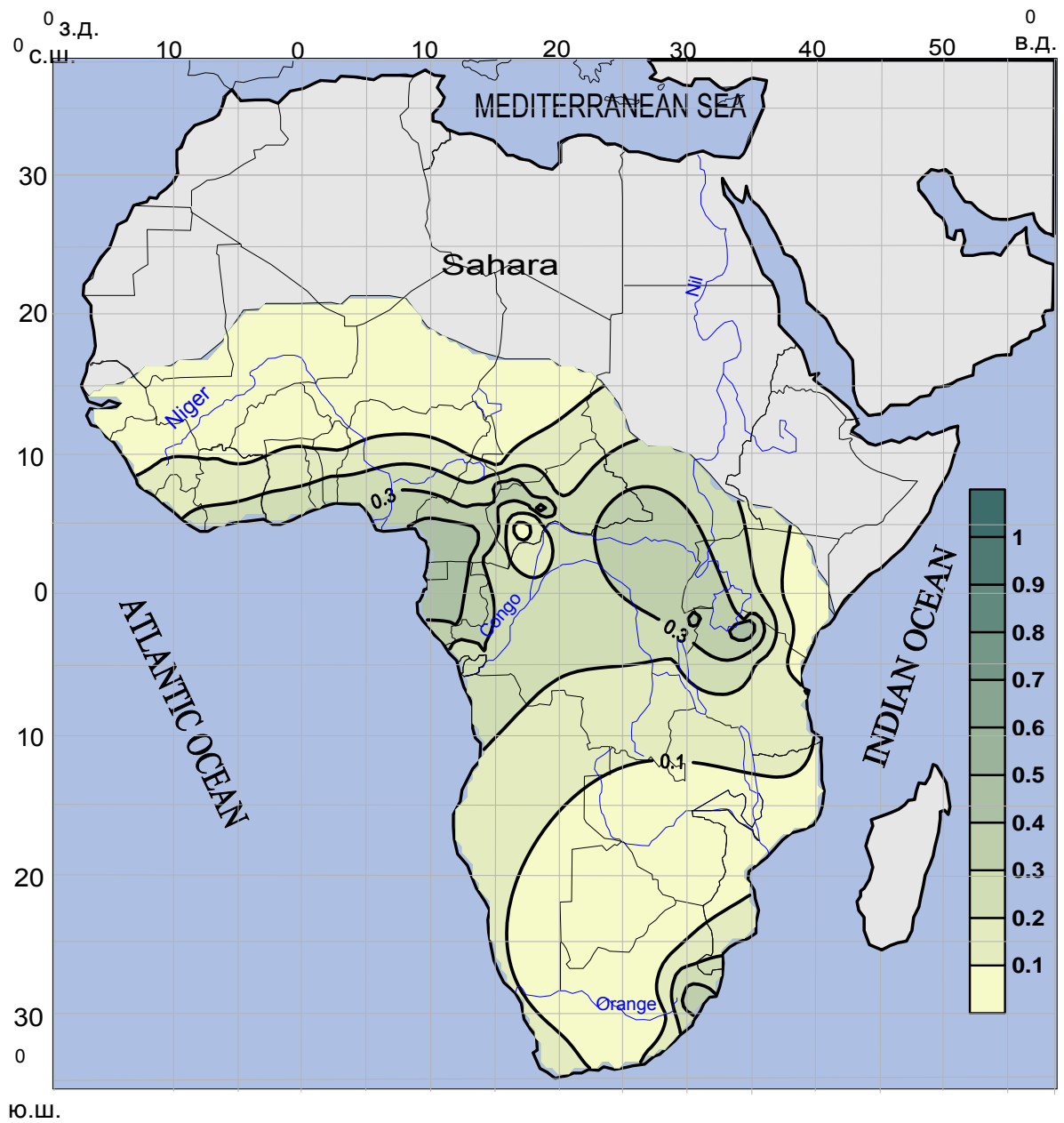


Рисунок А.5 – Прогнозные значения коэффициента стока по сценарию Commit.

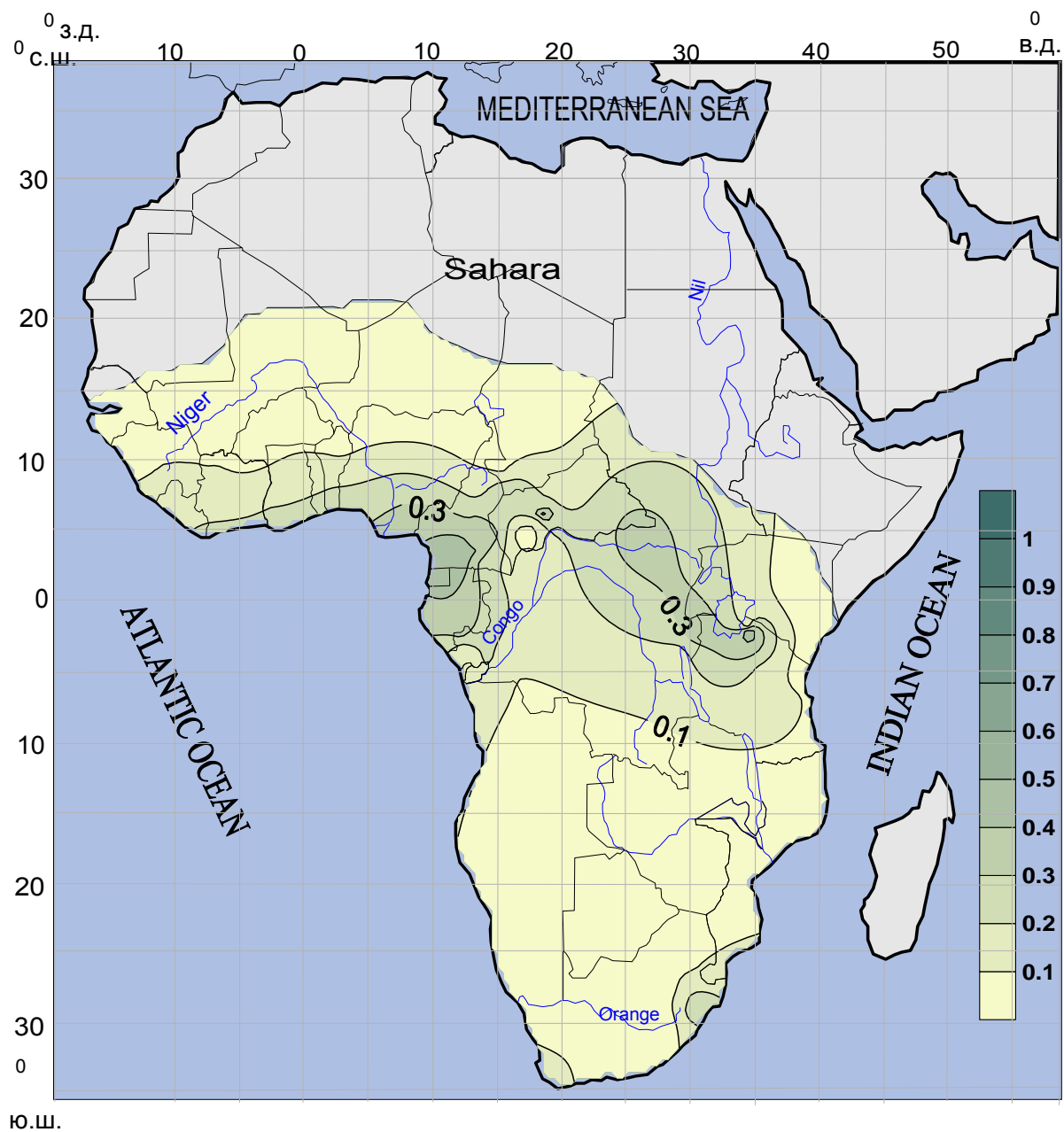


Рисунок А.6 – Прогнозные значения коэффициента стока по сценарию SRB1.

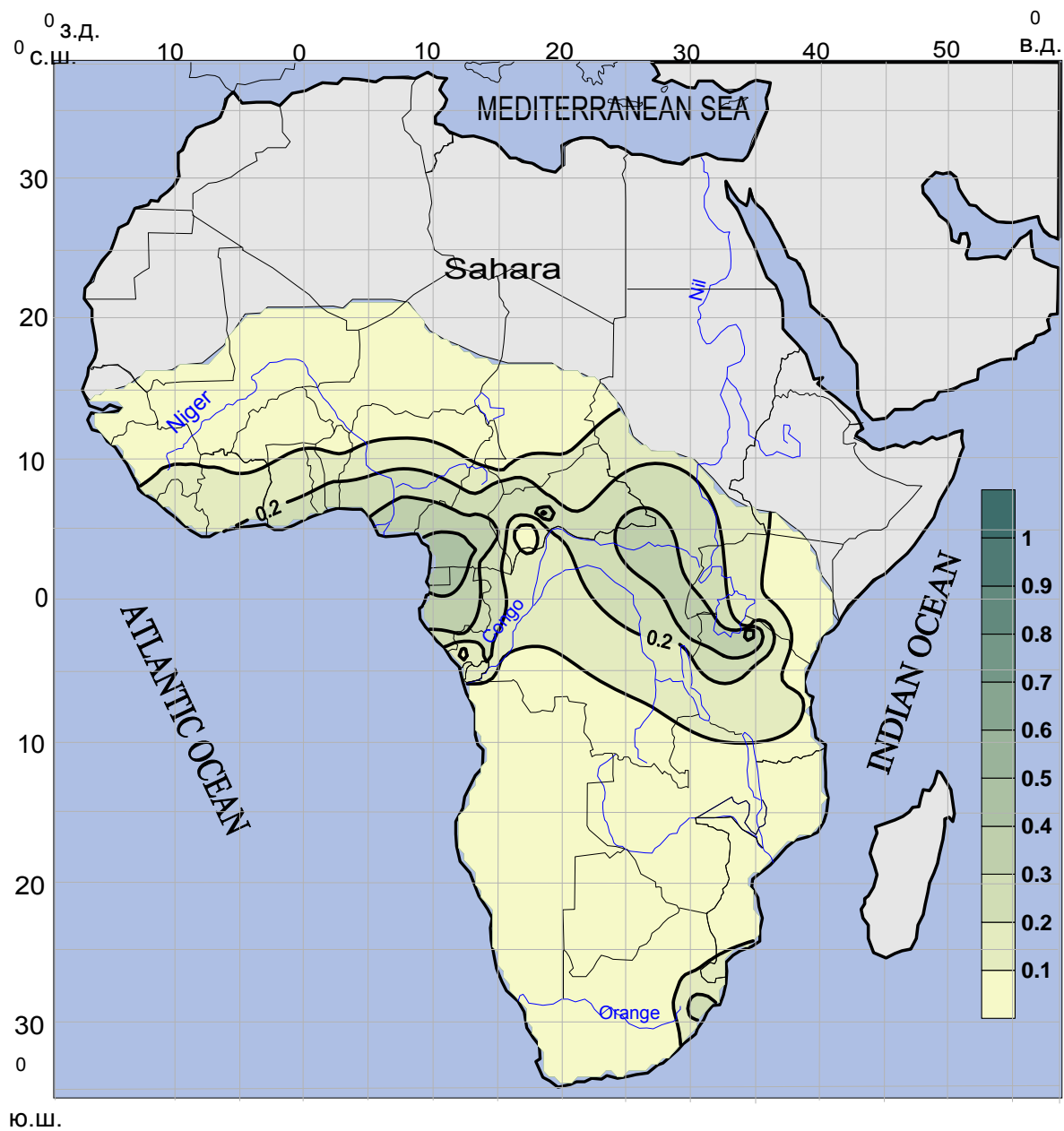


Рисунок А.7 – Прогнозные значения коэффициента стока по сценарию SRA2.

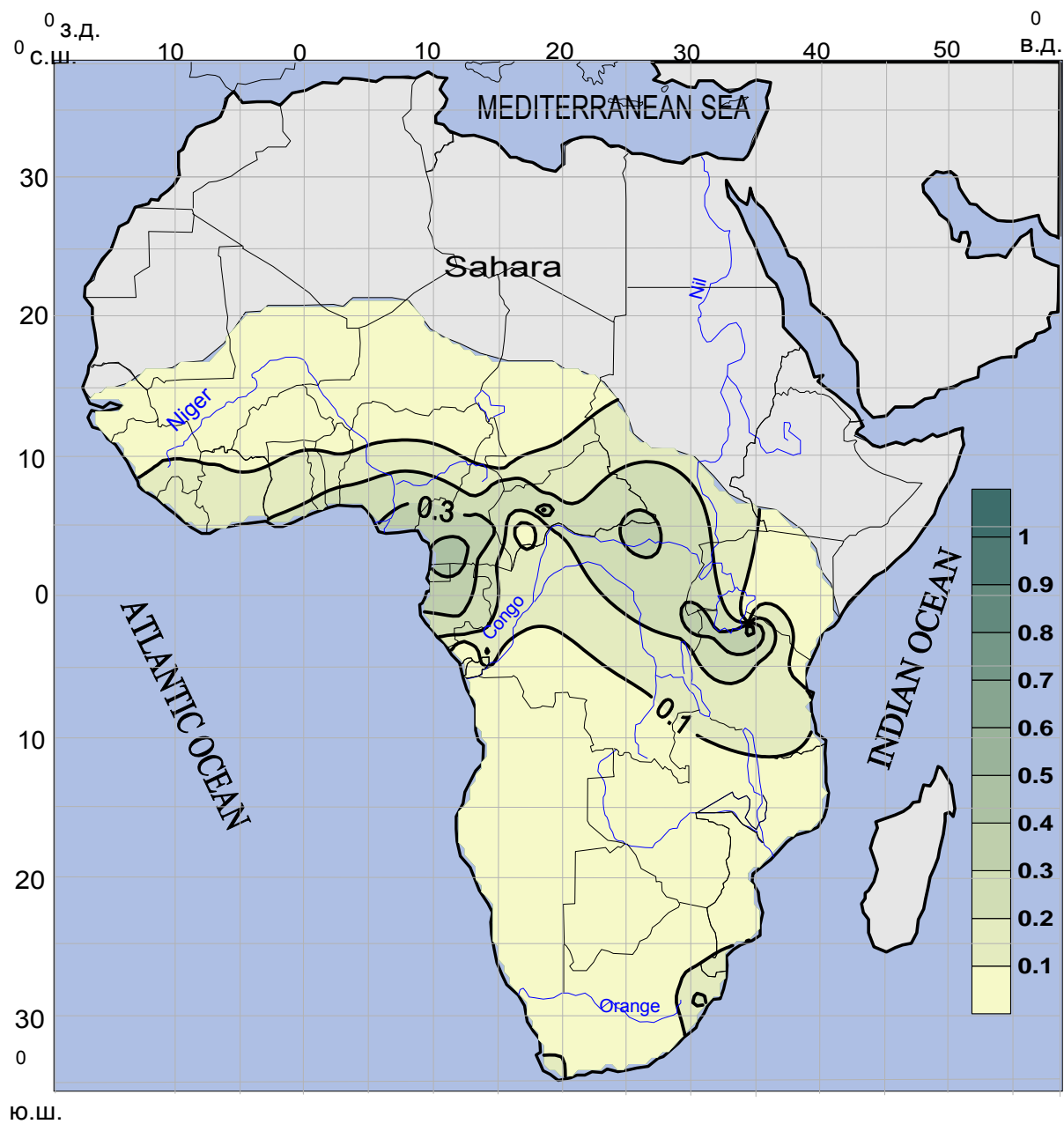


Рисунок А.8 – Прогнозные значения коэффициента стока по сценарию SRA1B.

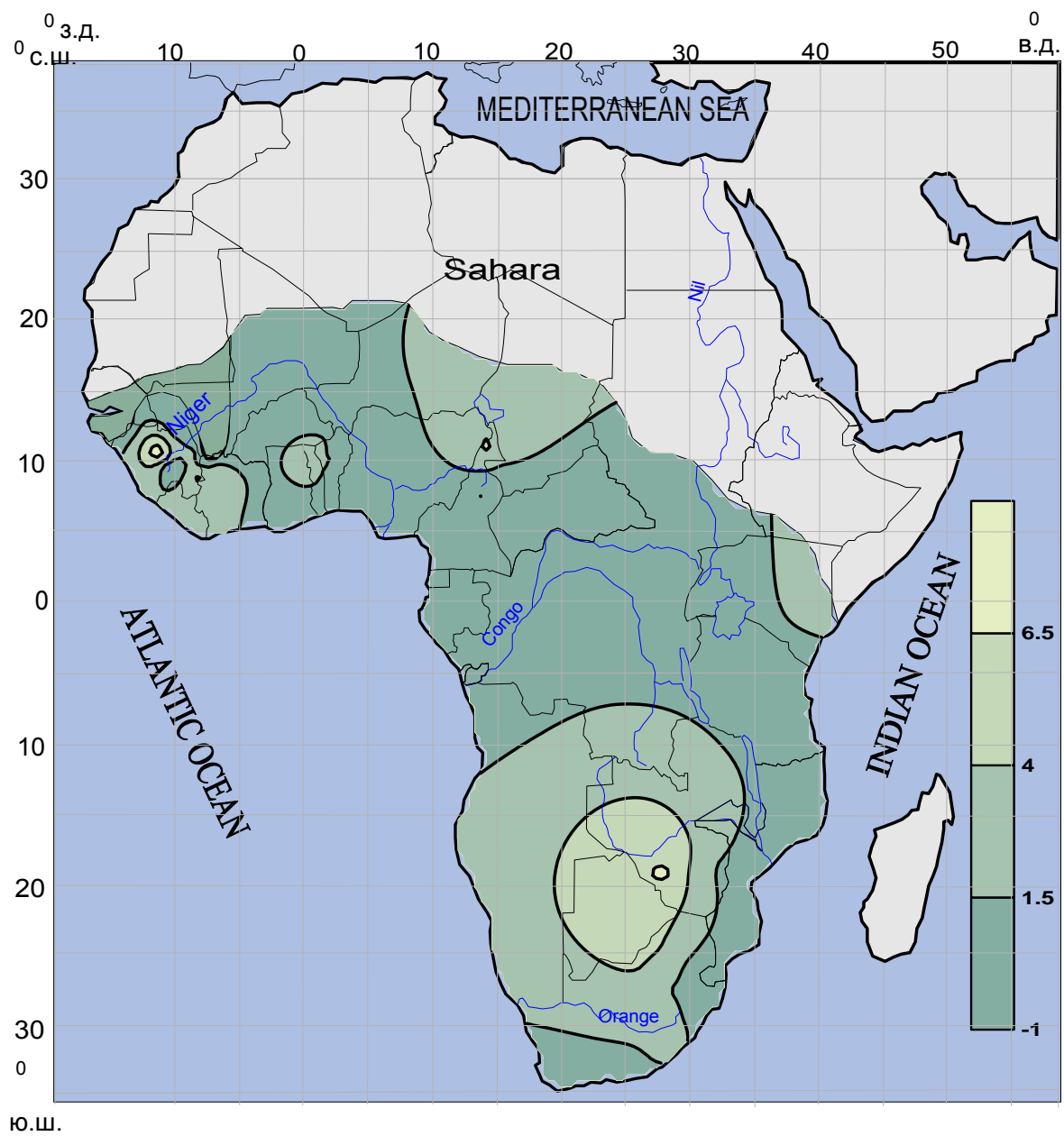


Рисунок А.9 – Прогнозные значения коэффициента асимметрии по сценарию Commit.

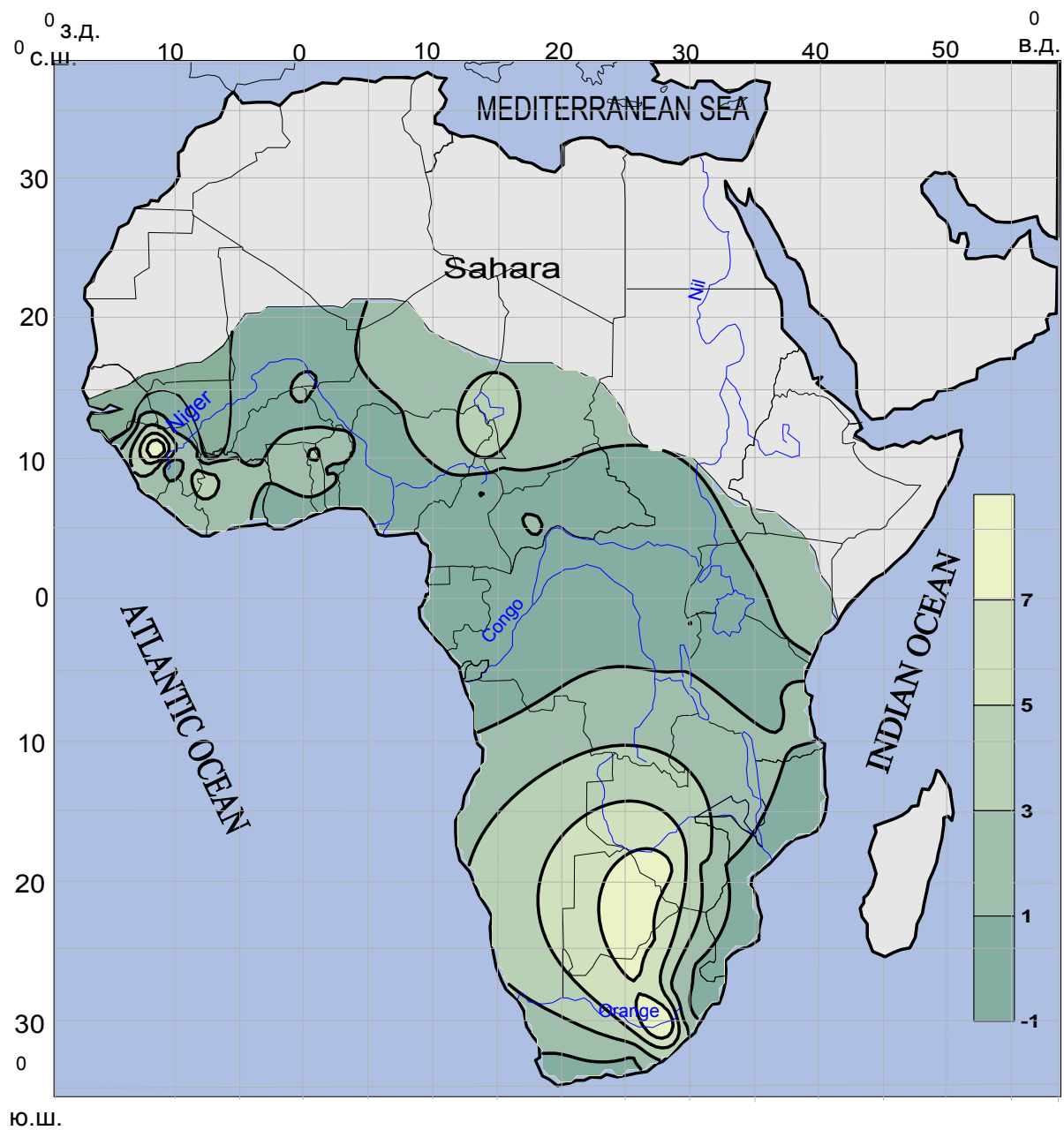


Рисунок А.10 – Прогнозные значения коэффициента асимметрии по сценарию SRB1.

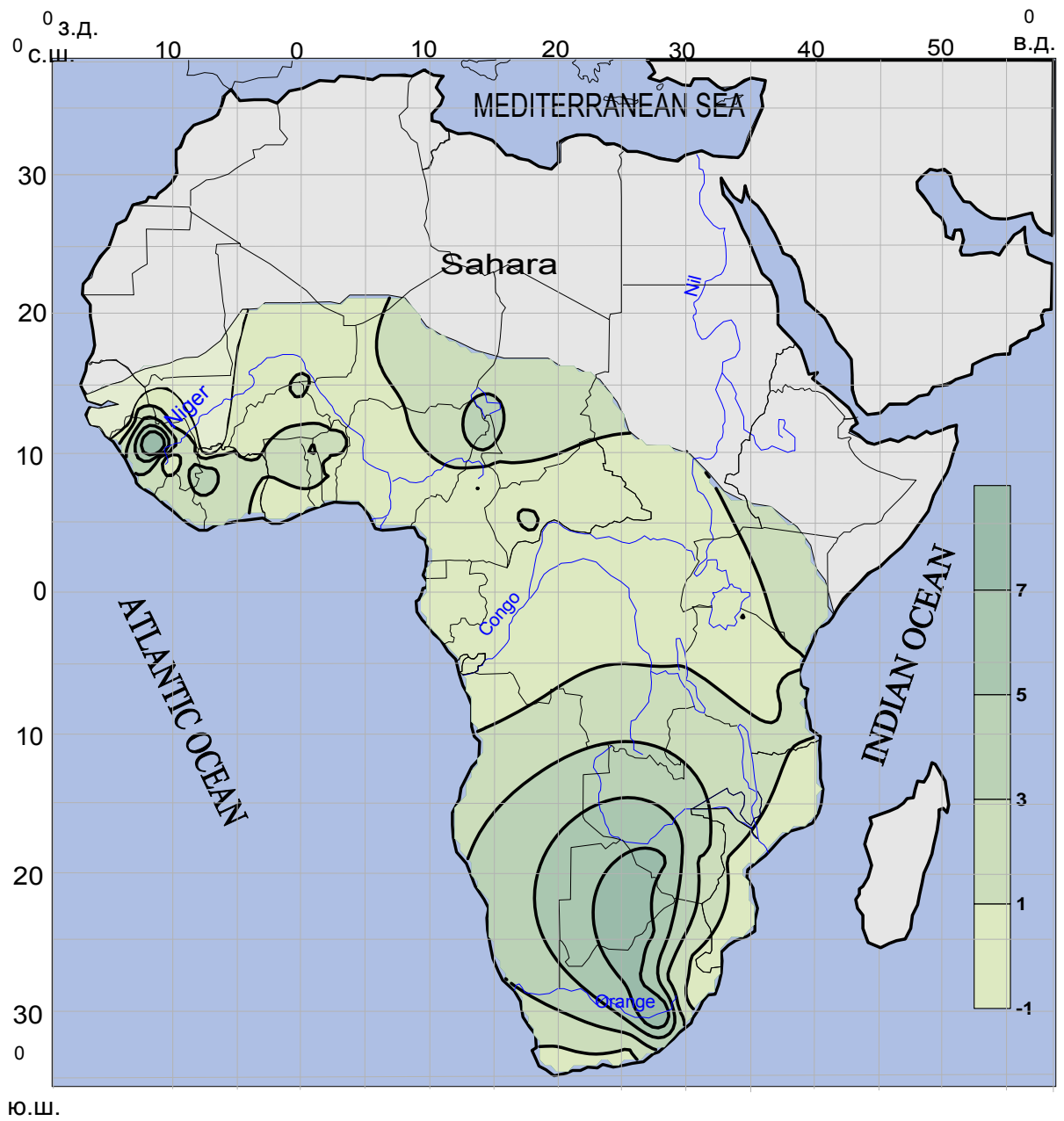


Рисунок А.11 – Прогнозные значения коэффициента асимметрии по сценарию SRA2.

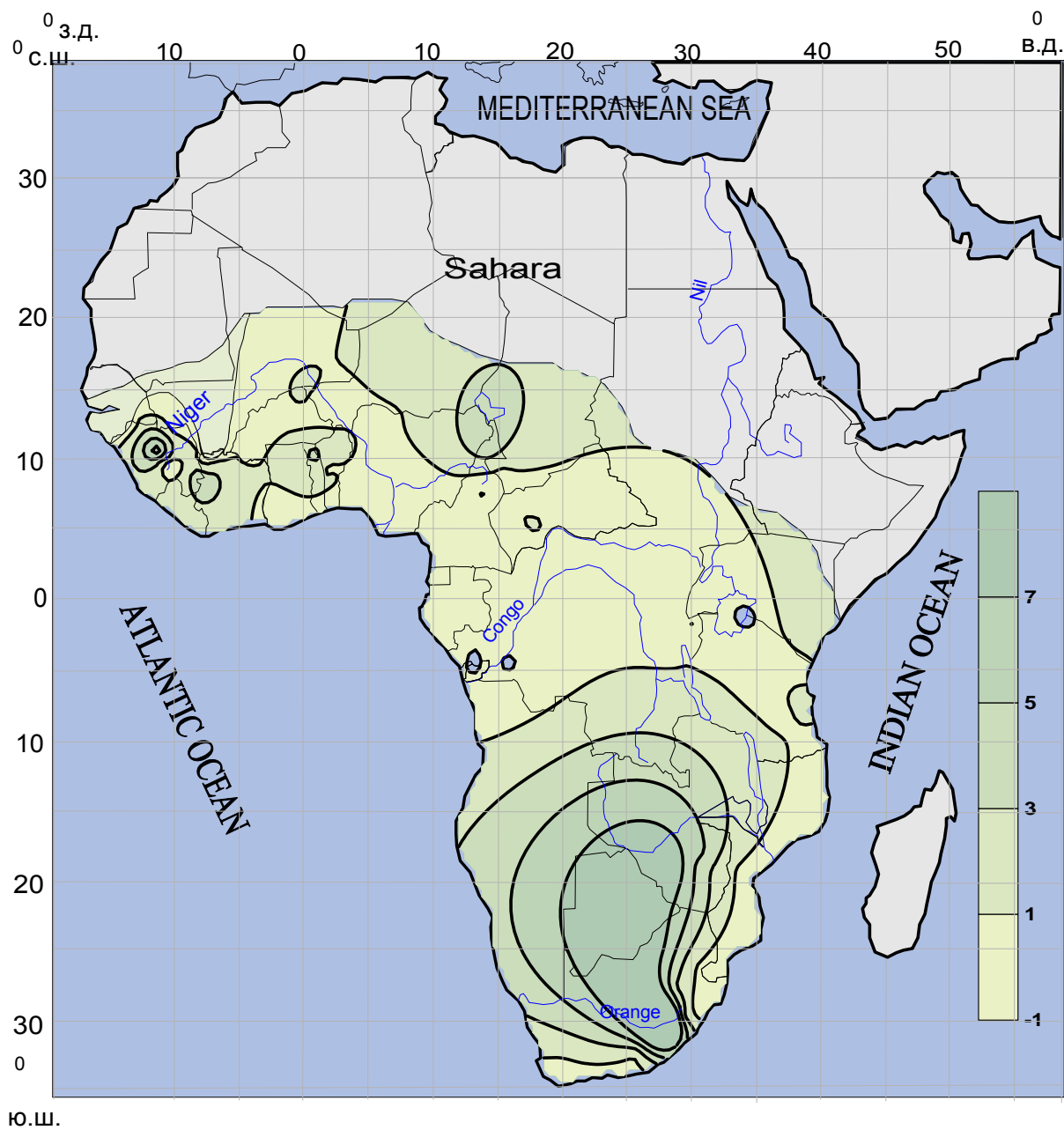


Рисунок А.12 – Прогнозные значения коэффициента асимметрии по сценарию SRA1B.

Приложение Б – Карты распределения прогнозного критерия устойчивости на период от 2040 по 2069 гг. по различным климатическим сценариям

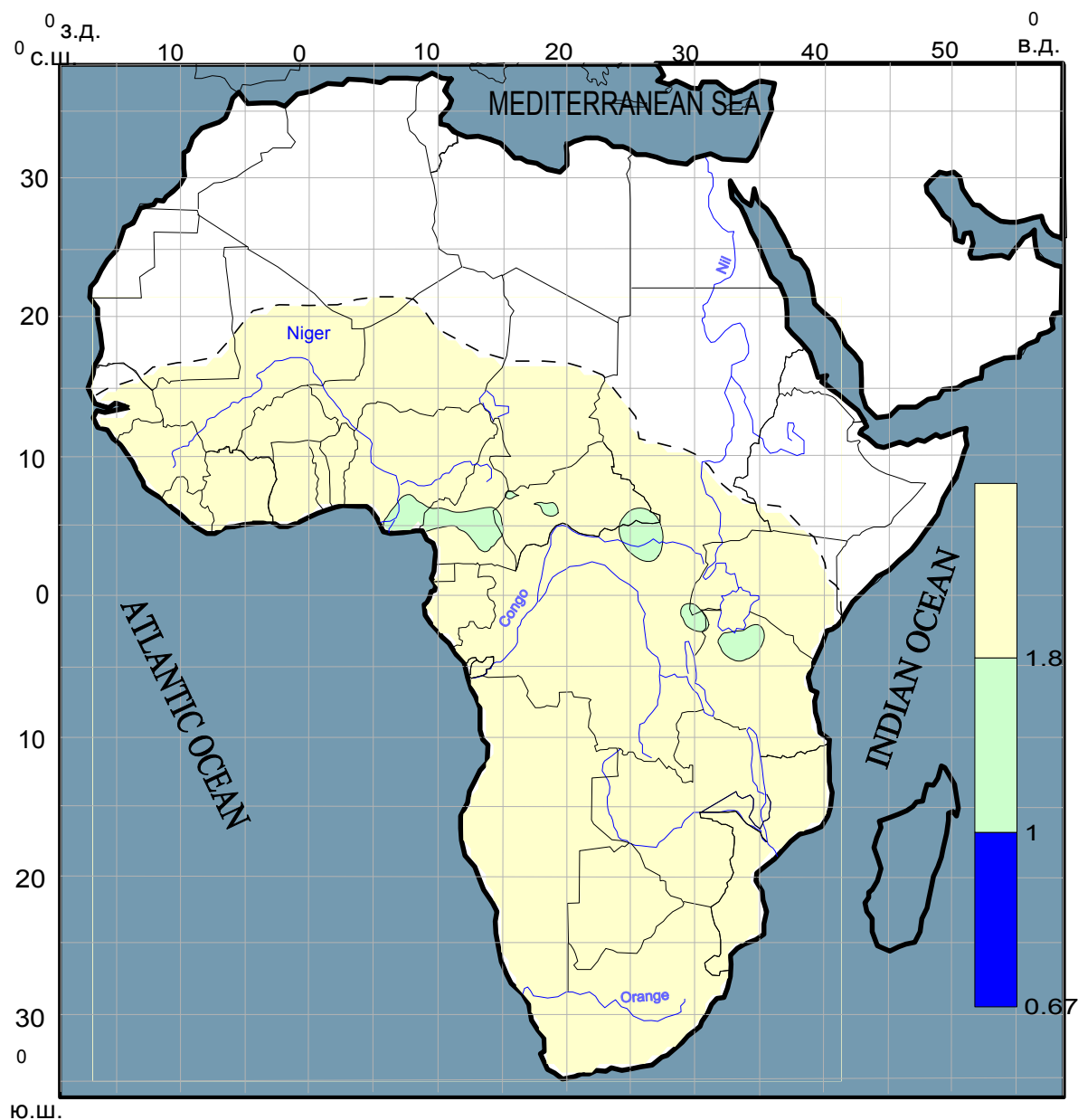


Рисунок Б.1 – Распределение прогнозных значений критерия устойчивости по территории Юго-Западной Африки на 2070 год по сценарию SRA1B.

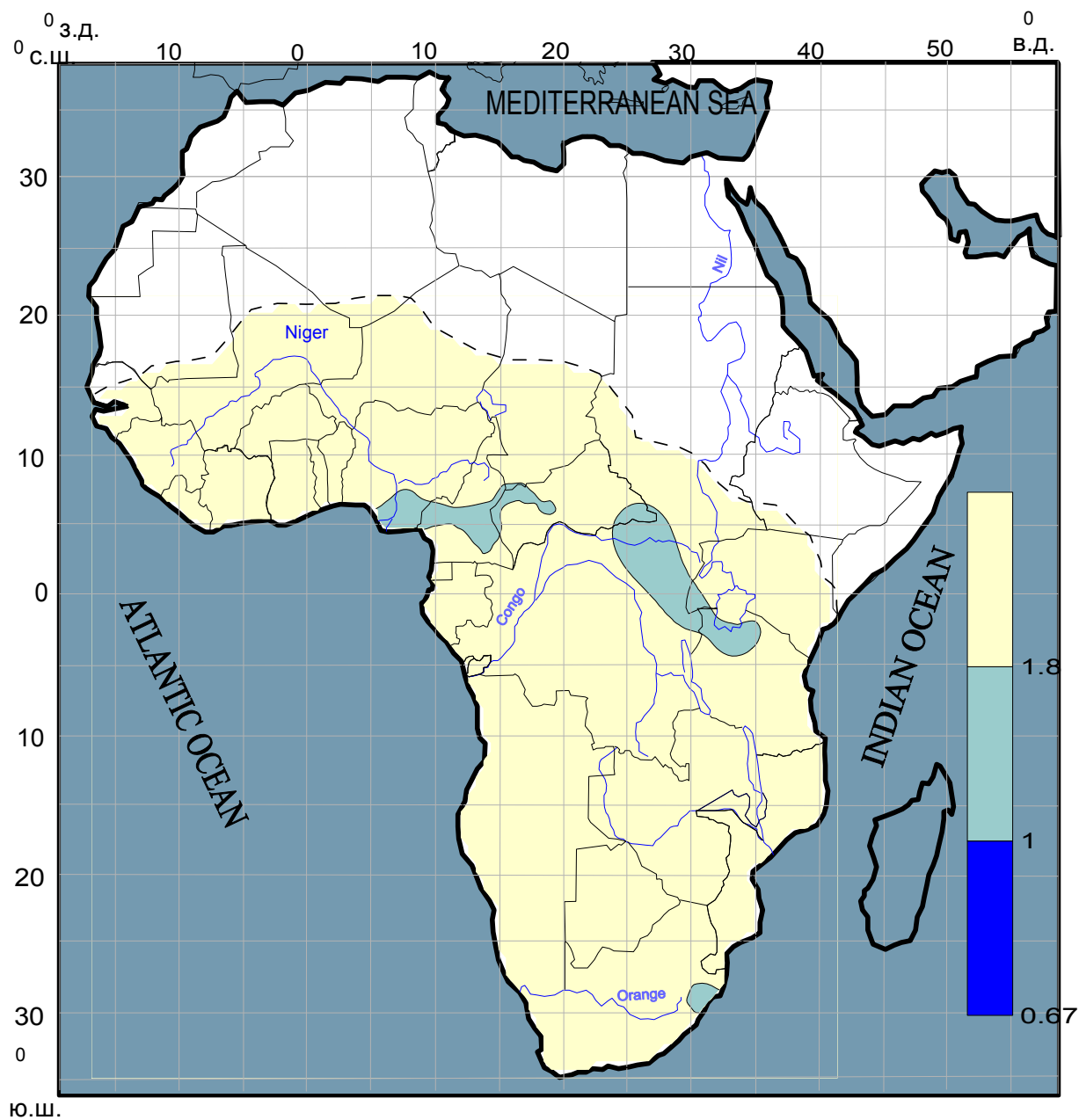


Рисунок Б.2 – Распределение прогнозных значений критерия устойчивости по территории Юго-Западной Африки на 2070 год по сценарию SRAB1.

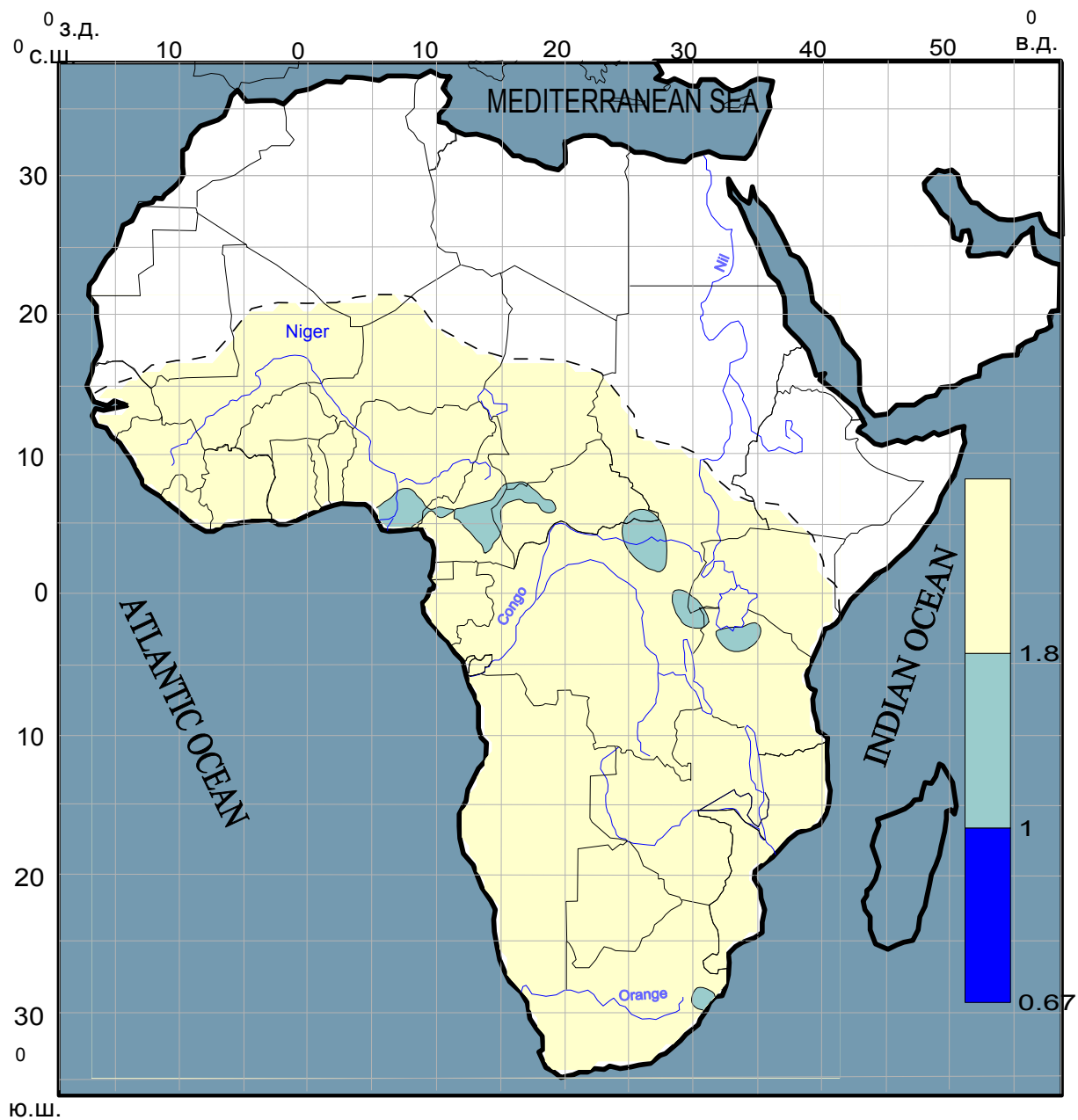


Рисунок Б.3 – Распределение прогнозных значений критерия устойчивости по территории Юго-Западной Африки на 2070 год по сценарию SRA2.

Приложение В – Корреляционная матрица для рядов рек Юго-Западной Африки

1	0,969858	0,470392	0,835692	0,400193	0,220526	0,690978	0,287501	0,018977
137	1	0,474088	0,894246	0,426114	0,210327	0,700552	0,309549	-0,13523
286	236	1	0,570409	0,457336	0,598377	0,39352	0,450263	-0,05511
188	64	190	1	0,613871	0,243284	0,715663	0,435792	-0,10674
408	327	135	265	1	0,274342	0,520927	0,38567	-0,29314
449	375	168	313	50	1	0,235387	0,423722	-0,00319
372	242	245	178	214	259	1	0,498796	-0,04986
539	443	274	373	134	115	261	1	-0,18724
612	524	334	454	199	162	348	87	1
587	485	328	413	186	169	283	54	85
562	453	318	379	182	178	237	74	136
574	463	331	389	195	191	244	84	140
611	493	383	418	249	249	257	143	187
789	672	549	592	401	386	428	271	256
825	699	609	618	465	459	444	346	349
894	761	712	680	576	580	503	472	490
947	819	735	733	586	579	557	465	461
965	836	760	750	612	608	573	494	493

Приложение Г – Оптимальная площадь и оптимальное число постов

Таблица Г.1 – Оптимальная площадь и оптимальное число постов для Западной Африки

Река	Станция	Страна	q , л/с км ²	F , км ²	$F_{\text{опт}} =$ 2000	$F_{\text{опт}} =$ 3000	$F_{\text{опт}} =$ 4000	$F_{\text{опт}} =$ 5000	$F_{\text{опт}} =$ 6000
MILO	KONSANKORO	ГВИНЕА	37,3	1000	1	0	0	0	0
TINKISSO	DABOLA	ГВИНЕА	11,8	1260	1	0	0	0	0
NIGER	FARANAH	ГВИНЕА	28,7	3180	2	1	1	1	1
MILO	KANKAN	ГВИНЕА	19,5	9620	5	3	2	2	2
NIANDAN	BARO	ГВИНЕА	16,9	12770	6	4	3	3	2
NIGER	KOUROUSSA	ГВИНЕА	14,2	18000	9	6	5	4	3
TINKISSO	OUARAN	ГВИНЕА	10,6	1260	1	0	0	0	0
SANKARANI	MANDIANA	ГВИНЕА	13,1	21900	11	7	5	4	4
IRANE	KOUTAKOUKROU	БЕНИН	3,66	1250	1	0	0	0	0
COUFFO	LANHOUNTA	БЕНИН	2,81	1680	1	1	0	0	0
MEKROU	KOMPONGOU	БЕНИН	3,19	5670	3	2	1	1	1
ALIBORI	ROUTE KANDI- BANIKOARA AMONT	БЕНИН	4,72	8170	4	3	2	2	1
ALIBORI	ROUTE KANDI- BANIKOARA AVAL	БЕНИН	3,23	8170	4	3	2	2	1
ZOU	DOME	БЕНИН	2,65	8210	4	3	2	2	1
ОКПАРА	КАБОУА	БЕНИН	3,06	9600	5	3	2	2	2
MEKROU	BAROU	БЕНИН	2,90	5670	3	2	1	1	1
MONO	АТНЕМЕ	БЕНИН	6,80	21575	11	7	5	4	4
PENDJARI	PORGA	БЕНИН	2,74	22280	11	7	6	4	4
OUEME	PONT DE SAVE	БЕНИН	4,69	23600	12	8	6	5	4
OUEME	SAGON	БЕНИН	4,68	37980	19	13	9	8	6
OUEME	BONOU	БЕНИН	4,13	46990	23	16	12	9	8
KOUROUKELE	IRADOUGOU	КОТ Д ИВУ- АР	15,2	2000	1	1	1	0	0

Продолжение таблицы Г.1

Река	Станция	Страна	q , л/с км ²	F , км ²	$F_{\text{опт}} =$ 2000	$F_{\text{опт}} =$ 3000	$F_{\text{опт}} =$ 4000	$F_{\text{опт}} =$ 5000	$F_{\text{опт}} =$ 6000
BAGOE	TOMBOUGOU 1	КОТ Д ИВУ- АР	17,7	2580	1	1	1	1	0
BAOULE (TRIB. NIGER)	DJIRILA	КОТ Д ИВУ- АР	9,39	3970	2	1	1	1	1
BAGOE	KOUTO AVAL	КОТ Д ИВУ- АР	7,79	4700	2	2	1	1	1
KULPAWN	YAGABA	ГАНА	3,24	10600	5	4	3	2	2
TANO	ALANDA	ГАНА	9,14	15800	8	5	4	3	3
PRA	DABOASI	ГАНА	10,4	22714	11	8	6	5	4
FALEME	FADOUGOU	МАЛИ	9,67	9300	5	3	2	2	2
FALEME	GOURBASSY	МАЛИ	8,35	15000	8	5	4	3	3
BAFING (TRIB. ATUI, SENEGAL)	DAKA SAYDOU	МАЛИ	15,4	15500	8	5	4	3	3
BAOULE (TRIB. NIGER)	BOUGOUNI	МАЛИ	6,58	15700	8	5	4	3	3
BAKOYE	TOUKOTO	МАЛИ	3,76	16000	8	5	4	3	3
BAGOE	PANKOUROU	МАЛИ	6,27	559	0	0	0	0	0
BAOULE (TRIB. NIGER)	DIOILA	МАЛИ	5,42	32500	16	11	8	7	5
BAFING (TRIB. ATUI, SENEGAL)	DIBIA	МАЛИ	10,7	33000	17	11	8	7	6
SANKARANI	SELINGUE	МАЛИ	10,6	34200	17	11	9	7	6
SANKARANI	GOUALA	МАЛИ	9,17	35300	18	12	9	7	6
BLACK VOLTA	BANZO	БУРКИНА ФАСО	4,04	2816	1	1	1	1	0
COMOE	DIARABAKOKO	БУРКИНА ФАСО	4,28	2350	1	1	1	0	0
BLACK VOLTA	SAMANDENI	БУРКИНА ФАСО	3,11	4580	2	2	1	1	1

Продолжение таблицы Г.1

Река	Станция	Страна	q , л/с км ²	F , км ²	$F_{\text{опт}} =$ 2000	$F_{\text{опт}} =$ 3000	$F_{\text{опт}} =$ 4000	$F_{\text{опт}} =$ 5000	$F_{\text{опт}} =$ 6000
LERABA	YENDERE	БУРКИНА ФАСО	5,60	5930	3	2	1	1	1
BOUGOURIBA	DAN	БУРКИНА ФАСО	3,60	6345	3	2	2	1	1
СОМОЕ	FOLONZO	БУРКИНА ФАСО	2,62	9480	5	3	2	2	2
BOUGOURIBA	DIEBOUGOU	БУРКИНА ФАСО	2,37	12200	6	4	3	2	2
BLACK VOLTA	NWOKUY	БУРКИНА ФАСО	1,80	14800	7	5	4	3	2
BLACK VOLTA	MANIMENSO	БУРКИНА ФАСО	1,12	2816	1	1	1	1	0
BLACK VOLTA	BOROMO	БУРКИНА ФАСО	0,93	37140	19	12	9	7	6
KOULOUNTOU	GUE DU P.N.N.K.	СЕНГАЛ	6,53	5350	3	2	1	1	1
GAMBIA	WASSADOU AMONT	СЕНГАЛ	7,99	21200	11	7	5	4	4
FALEME	KIDIRA	СЕНГАЛ	4,85	28900	14	10	7	6	5
GAMBIA	GOULOUMBOU	СЕНГАЛ	5,19	42000	21	14	11	8	7
DARGOL	TERA	НИГЕР	0,98	2750	1	1	1	1	0
MARADI	MADAROUNFA	НИГЕР	1,17	5400	3	2	1	1	1
DARGOL	KAKASSI	НИГЕР	0,80	6940	3	2	2	1	1
GAROUOL	DOLBEL	НИГЕР	1,28	7500	4	3	2	2	1
SIRBA	GARBE-KOUROU	НИГЕР	0,64	38750	19	13	10	8	6
GOROUOL	ALCONGUI	НИГЕР	0,20	44900	22	15	11	9	7
TSANAGA	BOGO	КАМЕРУН	5,98	1535	1	1	0	0	0
BINI	BEREM	КАМЕРУН	16,3	1585	1	1	0	0	0
VINA	LAHORE	КАМЕРУН	21,2	1690	1	1	0	0	0
NDJEKE	NGONGON	КАМЕРУН	11,2	3720	2	1	1	1	1
МАРЕ	MAGBA	КАМЕРУН	23,9	4020	2	1	1	1	1

Продолжение таблицы Г.1

Река	Станция	Страна	q , л/с км ²	F , км ²	$F_{\text{опт}} =$ 2000	$F_{\text{опт}} =$ 3000	$F_{\text{опт}} =$ 4000	$F_{\text{опт}} =$ 5000	$F_{\text{опт}} =$ 6000
NOUN	BAFOUSSAM	КАМЕРУН	22,2	4700	2	2	1	1	1
DJA	SOMALOMO	КАМЕРУН	11,9	5150	3	2	1	1	1
NYONG	AYOS	КАМЕРУН	10,3	5300	3	2	1	1	1
CROSS	MAMFE	КАМЕРУН	86,7	6810	3	2	2	1	1
MBERE	MBERE	КАМЕРУН	14,8	7430	4	2	2	1	1
NYONG	AKONOLINGA	КАМЕРУН	10,6	8350	4	3	2	2	1
KADEI	BATOURI	КАМЕРУН	13,4	8970	4	3	2	2	1
LOM	BETARE-OYA	КАМЕРУН	16,1	11100	6	4	3	2	2
NYONG	KAYA	КАМЕРУН	12,5	19985	10	7	5	4	3
NTEM	NGOAZIK	КАМЕРУН	14,9	18100	9	6	5	4	3
NYONG	OLAMA	КАМЕРУН	13,8	18510	9	6	5	4	3
KADEI	PANA	КАМЕРУН	11,5	20370	10	7	5	4	3
DJEREM	MBAKAOU	КАМЕРУН	19,7	20390	10	7	5	4	3
NYONG	DEHANE	КАМЕРУН	15,6	26400	13	9	7	5	4
MBAM	GOURA	КАМЕРУН	16,5	42300	21	14	11	8	7
DJA	NGBALA	КОНГО	8,08	38600	19	13	10	8	6
LOGONE	MOUNDOU	ЧАД	15,8	33970	17	11	8	7	6
Сумма					575	383	288	230	192

Таблица Г.2 – Оптимальная площадь и оптимальное число постов для Южной Африки

Река	Станция	Страна	F , км ²	q , л/с км ²	$F_{\text{опт}} =$ 4900	$F_{\text{опт}} =$ 5000	$F_{\text{опт}} =$ 5100
MATLABAS	HAARLEM EAST	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	1054	1,06	0	0	0
MEGALIES	SCHEERPOORT	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	1171	0,82	0	0	0
BOESMANS	DONKER HOEK ALICEDALE	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	1479	0,24	0	0	0
MOOIRIVIER (TRIB. TUGELA)	DOORNKLOOF	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	1546	5,77	0	0	0
MKOMAZI	LOT93.1821 CAMDEN	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	1744	12,3	0	0	0

Продолжение таблицы Г.2

Река	Станция	Страна	F , км ²	q , л/с км ²	$F_{\text{опт}} =$ 4900	$F_{\text{опт}} =$ 5000	$F_{\text{опт}} =$ 5100
WONDERBOOM SPRUIT	DIEPKLOOF	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	2397	0,61	0	0	0
KEISKAMMA	FARM	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	2530	1,26	1	1	0
OLIFANTS	WOLWEKRANS	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	3256	1,62	1	1	1
KLIP	DELANGESDRIFT	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	4152	1,51	1	1	1
INCOMATI	HOOGGENOEG	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	5540	2,45	1	1	1
BUFFELSRIVIER	TAYSIDE	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	5887	3,83	1	1	1
SANDRIVIER (TRIB. LIMPOPO)	ZAMENKOMST	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	6731	0,08	1	1	1
DORING	ELANDS DRIFT - ASPOORT	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	6895	1,23	1	1	1
GROOT-VIS	BRANDT LEGTE PIGGOT'S BRIDGE	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	23067	0,27	5	5	5
TUGELA	MANDINI	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	28920	3,32	6	6	6
GROOT-VIS	MATOLEMA'S LOCATION OUTSPAN	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	29745	0,32	6	6	6
ORANGE	ALI WAL NOORD (27819103)	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	37070	3,75	8	7	7
VAAL	ELANDSFONTEIN ENGELBRECHTSDRIFT	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	38564	1,14	8	8	8
KWE KWE	CACTUS POORT DAM U/S G/W	ЗИМБАБВЕ	1217	1,40	0	0	0
KWE KWE	CACTUS POORT DAM D/S G/W	ЗИМБАБВЕ	1250	2,67	0	0	0
SEBAKWE	SEBAKWE DAM D/S G/W	ЗИМБАБВЕ	1622	3,67	0	0	0
INGESI	BELINGWE ROAD	ЗИМБАБВЕ	1680	1,82	0	0	0
INSIZA	FILABUSI UPPER WEIR	ЗИМБАБВЕ	2000	1,14	0	0	0
ODZI	ODZI BRIDGE CONTROL SECTION	ЗИМБАБВЕ	2498	4,18	1	0	0
UMZINGWANI	GLASS BLOCK G/W	ЗИМБАБВЕ	2504	1,51	1	1	0

Продолжение таблицы Г.2

Река	Станция	Страна	F , км ²	q , л/с км ²	$F_{\text{опт}} = 4900$	$F_{\text{опт}} = 5000$	$F_{\text{опт}} = 5100$
MUNYATI	DYKE G/W	ЗИМБАБВЕ	2662	2,52	1	1	1
МАСНЕКЕ	CONDO U/S G/W	ЗИМБАБВЕ	3383	4,20	1	1	1
СЕВАКВЕ	DUTCHMAN'S POOL DAM D/S G/W	ЗИМБАБВЕ	4170	2,45	1	1	1
UMFULI	TWYFORD WEIR	ЗИМБАБВЕ	5180	2,48	1	1	1
UMNIATI	POWER STATION WEIR	ЗИМБАБВЕ	5890	1,83	1	1	1
SHANGANI	SIR G.HUGGINS BRIDGE FLUME	ЗИМБАБВЕ	5900	0,77	1	1	1
SAVE	CONDO D/S G/W	ЗИМБАБВЕ	11174	3,69	2	2	2
GWAAI	КАМАТИВИ G/W	ЗИМБАБВЕ	38600	0,55	8	8	8
Сумма					59	58	57

Таблица Г.3 – Оптимальная площадь и оптимальное число постов для Западной Африки (по сценарию Commit на 2069 год)

Станция	Страна	q , л/с км ²	F , км ²	$F_{\text{опт}} = 4500$	$F_{\text{опт}} = 5500$	$F_{\text{опт}} = 6500$	$F_{\text{опт}} = 7500$	$F_{\text{опт}} = 8500$
KONSANKORO	ГВИНЕА	37,3	1000	0	0	0	0	0
DABOLA	ГВИНЕА	11,8	1260	0	0	0	0	0
FARANAH	ГВИНЕА	28,7	3180	1	1	0	0	0
KANKAN	ГВИНЕА	19,5	9620	2	2	1	1	1
BARO	ГВИНЕА	16,9	12770	3	2	2	2	2
KOUROUSSA	ГВИНЕА	14,2	18000	4	3	3	2	2
OUARAN	ГВИНЕА	10,6	1260	0	0	0	0	0
MANDIANA	ГВИНЕА	13,1	21900	5	4	3	3	3
KOUTAKOUKROU	БЕНИН	3,66	1250	0	0	0	0	0
LANHOUNTA	БЕНИН	2,81	1680	0	0	0	0	0
KOMPONGOU	БЕНИН	3,19	5670	1	1	1	1	1
ROUTE KANDI-	БЕНИН	4,72	8170	2	1	1	1	1

Продолжение таблицы Г.3

Станция	Страна	q , л/с км ²	F , км ²	$F_{\text{опт}} = 4500$	$F_{\text{опт}} = 5500$	$F_{\text{опт}} = 6500$	$F_{\text{опт}} = 7500$	$F_{\text{опт}} = 8500$
BANIKOARA AMONT								
ROUTE KANDI- BANIKOARA AVAL	БЕНИН	3,23	8170	2	1	1	1	1
DOME	БЕНИН	2,65	8210	2	1	1	1	1
KABOUA	БЕНИН	3,06	9600	2	2	1	1	1
BAROU	БЕНИН	2,90	5670	1	1	1	1	1
ATHIEME	БЕНИН	6,80	21575	5	4	3	3	3
PORGA	БЕНИН	2,74	22280	5	4	3	3	3
PONT DE SAVE	БЕНИН	4,69	23600	5	4	4	3	3
SAGON	БЕНИН	4,68	37980	8	7	6	5	4
BONOU	БЕНИН	4,13	46990	10	9	7	6	6
IRADOUGOU	КОТ Д ИВУ- АР	15,2	2000	0	0	0	0	0
TOMBOUGOU 1	КОТ Д ИВУ- АР	17,7	2580	1	0	0	0	0
DJIRILA	КОТ Д ИВУ- АР	9,39	3970	1	1	1	1	0
KOUTO AVAL	КОТ Д ИВУ- АР	7,79	4700	1	1	1	1	1
YAGABA	ГАНА	3,24	10600	2	2	2	1	1
ALANDA	ГАНА	9,14	15800	4	3	2	2	2
DABOASI	ГАНА	10,4	22714	5	4	3	3	3
FADOUGOU	МАЛИ	9,67	9300	2	2	1	1	1
GOURBASSY	МАЛИ	8,35	15000	3	3	2	2	2
DAKA SAYDOU	МАЛИ	15,4	15500	3	3	2	2	2
BOUGOUNI	МАЛИ	6,58	15700	3	3	2	2	2
TOUKOTO	МАЛИ	3,76	16000	4	3	2	2	2
PANKOUROU	МАЛИ	6,27	559	0	0	0	0	0
DIOILA	МАЛИ	5,42	32500	7	6	5	4	4

Продолжение таблицы Г.3

Станция	Страна	q , л/с км ²	F , км ²	$F_{\text{опт}} = 4500$	$F_{\text{опт}} = 5500$	$F_{\text{опт}} = 6500$	$F_{\text{опт}} = 7500$	$F_{\text{опт}} = 8500$
DIBIA	МАЛИ	10,7	33000	7	6	5	4	4
SELINGUE	МАЛИ	10,6	34200	8	6	5	5	4
GOUALA	МАЛИ	9,17	35300	8	6	5	5	4
BANZO	БУРКИНА ФАСО	4,04	2816	1	1	0	0	0
DIARABAKOKO	БУРКИНА ФАСО	4,28	2350	1	0	0	0	0
SAMANDENI	БУРКИНА ФАСО	3,11	4580	1	1	1	1	1
YENDERE	БУРКИНА ФАСО	5,60	5930	1	1	1	1	1
DAN	БУРКИНА ФАСО	3,60	6345	1	1	1	1	1
FOLONZO	БУРКИНА ФАСО	2,62	9480	2	2	1	1	1
DIEBOUGOU	БУРКИНА ФАСО	2,37	12200	3	2	2	2	1
NWOKUY	БУРКИНА ФАСО	1,80	14800	3	3	2	2	2
MANIMENSO	БУРКИНА ФАСО	1,12	2816	1	1	0	0	0
BOROMO	БУРКИНА ФАСО	0,93	37140	8	7	6	5	4
GUE DU P.N.N.K.	СЕНГАЛ	6,53	5350	1	1	1	1	1
WASSADOU AMONT	СЕНГАЛ	7,99	21200	5	4	3	3	2
KIDIRA	СЕНГАЛ	4,85	28900	6	5	4	4	3
GOULOUMBOU	СЕНГАЛ	5,19	42000	9	8	6	6	5
TERA	НИГЕР	0,98	2750	1	1	0	0	0
MADAROUNFA	НИГЕР	1,17	5400	1	1	1	1	1
КАКАССИ	НИГЕР	0,80	6940	2	1	1	1	1

Продолжение таблицы Г.3

Станция	Страна	q , л/с км ²	F , км ²	$F_{\text{опт}} = 4500$	$F_{\text{опт}} = 5500$	$F_{\text{опт}} = 6500$	$F_{\text{опт}} = 7500$	$F_{\text{опт}} = 8500$
DOLBEL	НИГЕР	1,28	7500	2	1	1	1	1
GARBE-KOUROU	НИГЕР	0,64	38750	9	7	6	5	5
ALCONGUI	НИГЕР	0,20	44900	10	8	7	6	5
BOGO	КАМЕРУН	5,98	1535	0	0	0	0	0
BEREM	КАМЕРУН	16,3	1585	0	0	0	0	0
LAHORE	КАМЕРУН	21,2	1690	0	0	0	0	0
NGONGON	КАМЕРУН	11,2	3720	1	1	1	0	0
MAGBA	КАМЕРУН	23,9	4020	1	1	1	1	0
BAFOUSSAM	КАМЕРУН	22,2	4700	1	1	1	1	1
SOMALOMO	КАМЕРУН	11,9	5150	1	1	1	1	1
AYOS	КАМЕРУН	10,3	5300	1	1	1	1	1
MAMFE	КАМЕРУН	86,7	6810	2	1	1	1	1
MBERE	КАМЕРУН	14,8	7430	2	1	1	1	1
AKONOLINGA	КАМЕРУН	10,6	8350	2	2	1	1	1
BATOURI	КАМЕРУН	13,4	8970	2	2	1	1	1
BETARE-OYA	КАМЕРУН	16,1	11100	2	2	2	1	1
KAYA	КАМЕРУН	12,5	19985	4	4	3	3	2
NGOAZIK	КАМЕРУН	14,9	18100	4	3	3	2	2
OLAMA	КАМЕРУН	13,8	18510	4	3	3	2	2
PANA	КАМЕРУН	11,5	20370	5	4	3	3	2
МБАКАОУ	КАМЕРУН	19,7	20390	5	4	3	3	2
DEHANE	КАМЕРУН	15,6	26400	6	5	4	4	3
GOURA	КАМЕРУН	16,5	42300	9	8	7	6	5
NGBALA	КОНГО	8,08	38600	9	7	6	5	5
MOUNDOU	ЧАД	15,8	33970	8	6	5	5	4
Сумма				256	209	177	153	135

Таблица Г.4 – Оптимальная площадь и оптимальное число постов для Южной Африки (по сценарию Commit на 2069 год)

Станция	Страна	F_s , км ²	q , л/с км ²	$F_{\text{опт}} = 5000$	$F_{\text{опт}} = 7000$	$F_{\text{опт}} = 9000$	$F_{\text{опт}} = 11000$	$F_{\text{опт}} = 13000$	$F_{\text{опт}} = 15000$
HAARLEM EAST	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	1054	1	0	0	0	0	0	0
SCHEERPOORT	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	1171	1	0	0	0	0	0	0
DONKER HOEK ALICEDALE	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	1479	0	0	0	0	0	0	0
DOORNKLOOF	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	1546	6	0	0	0	0	0	0
LOT93.1821 CAMDEN	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	1744	12	0	0	0	0	0	0
DIERKLOOF	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	2397	1	0	0	0	0	0	0
FARM 7	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	2530	1	1	0	0	0	0	0
WOLWEKRANS	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	3256	2	1	0	0	0	0	0
DELANGESDRIFT	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	4152	2	1	1	0	0	0	0
HOOGGENOEG	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	5540	2	1	1	1	1	0	0
TAYSIDE	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	5887	4	1	1	1	1	0	0
ZAMENKOMST	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	6731	0	1	1	1	1	1	0
ELANDS DRIFT - ASPOORT	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	6895	1	1	1	1	1	1	0
BRANDT LEGTE PIGGOT'S BRIDGE	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	23067	0	5	3	3	2	2	2
MANDINI	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	28920	3	6	4	3	3	2	2
MATOLEMA'S LOCATION OUTSPAN	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	29745	0	6	4	3	3	2	2
ALIWAL NOORD	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	37070	4	8	5	4	3	3	2
ELANDSFONTEIN ENGELBRECHTSDRIFT	АФРИКАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА	38564	1	8	6	4	4	3	3
CACTUS POORT DAM U/S G/W	ЗИМБАБВЕ	1217	1	0	0	0	0	0	0
CACTUS POORT DAM	ЗИМБАБВЕ	1250	3	0	0	0	0	0	0

Продолжение таблицы Г.4

Станция	Страна	F_3 , км ²	q , л/с км ²	$F_{\text{опт}} =$ 5000	$F_{\text{опт}} =$ 7000	$F_{\text{опт}} =$ 9000	$F_{\text{опт}} =$ 11000	$F_{\text{опт}} =$ 13000	$F_{\text{опт}} =$ 15000
D/S G/W									
SEBAKWE DAM D/S G/W	ЗИМБАБВЕ	1622	4	0	0	0	0	0	0
BELINGWE ROAD	ЗИМБАБВЕ	1680	2	0	0	0	0	0	0
FILABUSI UPPER WEIR	ЗИМБАБВЕ	2000	1	0	0	0	0	0	0
ODZI BRIDGE CONTROL SECTION	ЗИМБАБВЕ	2498	4	1	0	0	0	0	0
GLASS BLOCK G/W	ЗИМБАБВЕ	2504	2	1	0	0	0	0	0
DYKE G/W	ЗИМБАБВЕ	2662	3	1	0	0	0	0	0
CONDO U/S G/W	ЗИМБАБВЕ	3383	4	1	0	0	0	0	0
DUTCHMAN'S POOL DAM D/S G/W	ЗИМБАБВЕ	4170	2	1	1	0	0	0	0
TWYFORD WEIR	ЗИМБАБВЕ	5180	2	1	1	1	0	0	0
POWER STATION WEIR	ЗИМБАБВЕ	5890	2	1	1	1	1	0	0
SIR G.HUGGINS BRIDGE FLUME	ЗИМБАБВЕ	5900	1	1	1	1	1	0	0
CONDO D/S G/W	ЗИМБАБВЕ	11174	4	2	2	1	1	1	1
КАМАТИВИ G/W	ЗИМБАБВЕ	38600	1	8	6	4	4	3	3
Сумма				59	42	32	26	22	19

«УТВЕРЖДАЮ»
проректор по учебной работе Россий-
ского государственного
гидрометеорологического
университета, к.г.н.



/Сакович В. М./

« 11 » октября 2014 г.

СПРАВКА


о внедрении результатов исследования

аспиранта Куасси Модеста Куаме, полученных при подготовке кандидатской диссертации на тему: «Сценарная оценка долгосрочных изменений вероятностных характеристик многолетнего стока Юго-Западной Африки»

В результате подготовки диссертации автором получены карты распределения по территории Юго-Западной Африки статистических характеристик многолетнего годового стока на XXI в. для четырех климатических сценариев, учитывающих различные условия экономического роста стран Африки. Совместно с аналогичными картами для текущего климата они дают целостное представление о гидрологических последствиях изменения климата и позволяют повысить устойчивость прогнозируемых вероятностных распределений годового стока рек. Кроме того, разработанная методика оценки интенсивности климатического шума находится в рамках развиваемого в РГГМУ нового научного направления «Частично инфинитное моделирование». Результаты диссертации внедрены в учебный процесс при подготовке магистров по направлению «Прикладная гидрометеорология», вошли в программу курса «Гидродинамическое моделирование природных процессов», читаемого на гидрологическом факультете РГГМУ.

Материалы, полученные Куасси Модестом, использовались при выполнении НИР в рамках темы «Географические закономерности распределений на территории России аномальных зон формирования экстремальных видов многолетнего речного стока в перспективе долгосрочных климатических изменений», финансируемой Министерством образования и науки РФ (грант, проект № 14.В37.21.0678).

Заместитель декана
по учебной работе
гидрологического факультета,
к.г.н, доцент

 / Шаночкин С. В./



Université
Jean Lorougnon Guédé

NOTE D'APPROBATION

Vice-Président de l'Université
« Jean Lorougnon Guédé »
(Côte d'Ivoire)

2014.009 / VP PVURIT/

27/ OCT 2014

NOTE

Délivrée à Kouassi Kouamé Modeste, doctorant à l'université d'état hydrométéorologique de Russie pour être présentée au conseil scientifique lors de la soutenance de la thèse sur le thème « Estimation du scénario des variations à long terme des caractéristiques aléatoires de l'écoulement pluriannuel en Afrique du sud-ouest ».

L'un des principaux résultats de la thèse de Kouassi Modeste est l'identification et la cartographie des zones présentant des déclinaisons (anomalies) statistiques relatives aux caractéristiques prévisionnelles qui s'établissent à partir des données physiques. Aussi, ressort-il une évaluation des possibles conséquences de l'apparition des zones d'irrégularité sur l'économie des pays de l'Afrique du sud-ouest. La méthode d'identification de telles zones est convenable à la Côte d'Ivoire car elle peut s'appliquer aussi bien sur les vastes territoires (tel que l'Afrique du sud-ouest) que sur les bassins isolés portant des installations hydrotechniques en projet ou même déjà en exploitation. Les résultats de Kouassi Modeste sont utilisables dans les travaux de recherche scientifiques, avec des indications complémentaires dans le cas des bassins fluviaux de la Côte d'Ivoire.

Par ailleurs, un intérêt particulier est présenté par les cartes de répartition du critère de stabilité pour le climat actuel. Elles sont obtenues en considérant les scénarios climatiques. De telles cartes sont établies par des étudiants de spécialité "hydrologie appliquée", dans le but de les présenter avec une possibilité d'obtention des caractéristiques statistiques non fiables. Cela permet d'étudier les installations hydrotechniques par utilisation des informations qui reflètent nettement le régime hydrologique de nos jours.

Vice-Président, chargé de
la recherche scientifique
Professeur Kouadio Yatty Justin



Enseignant-chercheur,
Docteur en sciences et techniques
Kouassi Bi Guessan Armand

Dr KOUASSI Bi A.
Enseignant - Chercheur
Université Jean Lorougnon Guédé
BP 150