



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрофизики и гидропрогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему

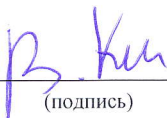
**Учет испарения при вероятно-
стной оценке гидрологического
режима рек Африки**

Исполнитель _____ Синкпеун Люсьен

Руководитель _____ д.т.н, профессор
(ученая степень, ученое звание)

_____ Коваленко Виктор Васильевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

_____ 
(подпись)

_____ д.т.н., профессор
(ученая степень, ученое звание)

_____ Коваленко Виктор Васильевич
(фамилия, имя, отчество)

«07» июня 2016 г.

Санкт-Петербург
2016



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрофизики и гидропрогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему

**Учет испарения при вероятно-
стной оценке гидрологического
режима рек Африки**

Исполнитель _____ Синкпеун Люсьен

Руководитель _____ д.т.н, профессор

(ученая степень, ученое звание)

Коваленко Виктор Васильевич

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

(ученая степень, ученое звание)

(фамилия, имя, отчество)

«07» июня 2016 г.

Санкт-Петербург
2016

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
1 Метод долгосрочного прогнозирования характеристик годового стока	6
1.1 Методика оценки гидрологических последствий изменения климата	6
1.2 Ретроспективные долгосрочные прогнозы для Российских бассейнов	10
1.3 Постановка задачи исследований	13
2 Формирование базы данных расходов воды рек Африки	15
2.1 Гидрологическая информация	15
2.2 Метеорологическая информация	41
3 Ретроспективные прогнозы вероятностных характеристик годового стока Африки	46
3.1 Прямой прогноз	46
3.2 Обратный прогноз	50
4 Неустойчивость и фрактальная диагностика рядов годового стока рек Африки	55
4.1 Неустойчивость процесса формирования годового стока	56
4.2 Фрактальная размерность рядов годового стока	59
5 Генерирование рядов испарения	62
6 Обеспеченные условные и безусловные расходы воды	68
Заключение	86
Список использованных источников	87
Приложение А – Обеспеченные значения слоя стока	90
Приложение Б – Гистограммы и кривые обеспеченностей	92

ВВЕДЕНИЕ

Формирование водного режима, как правило, происходит поверхностными так и подземными путями.

Влияние испарения выражается, главным образом, на понижении температуры в различных водоемах, что очень важно в отрасли гидрометеорологии при проектировании и эксплуатации водохранилищ, расчетов запаса воды в почвах, эксплуатации мелиоративных систем, охлаждающих прудов тепловых электрических станций – вот далеко не полный перечень проблем, стоявших в центре внимания. Поэтому сегодня исследование испарения и методов его учета, в общем смысле этого слова, поднимается до специального научного исследования, предметом которого являются перспективы развития оценки характеристик гидрологического режима рек любого государства.

Прогноз же, как одна из составляющих учета испарения, определяется как вероятностное, научно обоснованное суждение о возможных состояниях того или иного объекта в будущем и (или) об альтернативных путях и сроках их осуществления. В качестве объектов прогнозирования могут выступать процессы, явления, события, на которые направлена познавательная практическая деятельность человека.

Многие отрасли экономики, деятельность которых тесно связана с использованием водных ресурсов, нуждаются в гидрологических прогнозах. Надежный прогноз позволяет оптимизировать хозяйственную деятельность с учетом потребностей производства. Обеспечение энергетики гидрологической информацией и прогнозами осуществляется в период проведения комплекса работ по строительству и во время эксплуатации гидротехнических сооружений. Во время эксплуатации гидроэлектростанций (ГЭС) прогнозы используются в целях оптимизации режимов регули-

рования стока рек, для планирования выработки электроэнергии и принятия мер по пропуску паводка через гидроузлы.

Речной транспорт нуждается в прогнозах уровней воды, резкого изменения водности. Большое значение для коммунального хозяйства, автомобильного и железнодорожного транспорта, горнодобывающей промышленности имеют предупреждения о затоплениях и наводнениях. Сельское хозяйство нуждается, главным образом, в прогнозах водности территорий орошаемого земледелия. На основе этих прогнозов планируются размеры посевных площадей, режим поливов и распределение воды между оросительными системами.

В зоне неорошаемого земледелия на основе прогнозов водности устанавливаются площади затопления, определяется объем сельскохозяйственного попуска воды из водохранилищ.

Прогнозы освобождения пойм реки от воды дают возможность установить время начала полевых работ на этих площадях.

Прогнозы загрязнения поверхностных вод еще только входят в оперативную практику. Основой для них являются прогнозы водности, по данным о которых можно судить о концентрации тех или иных веществ при постоянных или разовых промышленных сбросах в реки.

Актуальным становится вопрос долгосрочных прогнозов стока и испарения, позволяющих оценивать гидрологический режим задолго до его наступления. В этом направлении много сделано на кафедре гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ. В основе методики лежит уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова, которое апробировано на многочисленных водосборах России.

К сожалению, до сих пор апробация этой методики оценки гидрологических последствий изменения климата производилась только на российских водосборах. И хотя по климатическим условиям некоторые африканские водосборы близки к условиям южных регионов России, была по-

ставлена задача провести апробацию методики для африканских водосборов, по возможности, расположенных в различных климатических зонах.

Кроме того, для водосборов Африки испарение имеет большое значение, поэтому необходимо учитывать его в методике оценки вероятностного режима стока.

1 МЕТОД ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГОДОВОГО СТОКА

1.1 Методика оценки гидрологических последствий изменения климата

Основой базовой стохастической модели формирования речного стока является дифференциальное уравнение первого порядка [1]:

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

где Q – осредненные среднегодовые расходы воды (модули или слои) в замыкающем створе речного бассейна;

k – коэффициент стока;

τ – время релаксации речного бассейна ($\tau = 1$ год).

После введения в (1) шумов, получим стохастическое дифференциальное уравнение (модель линейного формирующего фильтра):

$$dQ = [-(\bar{c} + \tilde{c})Q + \bar{N} + \tilde{N}]dt, \quad (2)$$

где $c = 1/k\tau = \bar{c} + \tilde{c}$;

$N = \dot{X} / \tau = \bar{N} + \tilde{N}$;

$\bar{c}$, $\bar{N}$ – математические ожидания;

$\tilde{c}$, $\tilde{N}$ – белые коррелированные друг с другом шумы с интенсивностями $G_{\tilde{c}}$, $G_{\tilde{N}}$ и взаимной интенсивностью $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$.

Уравнение (2) статистически эквивалентно уравнению Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК), описывающему марковскую эволюцию плотности вероятности $p(Q, t)$:

$$\frac{\partial p(Q; t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Q}(A(Q; t)p(Q; t)) + 0.5 \frac{\partial^2}{\partial Q^2}(B(Q; t)p(Q; t)), \quad (3)$$

где A и B коэффициенты сноса и диффузии, определяющие физико–статистическими параметрами, входящими в (2).

Основным аргументом в пользу модели (3), как описывающей процесс формирования многолетнего стока, является то обстоятельство, что для стационарных случайных процессов оно переходит в уравнение Пирсона

$$\frac{dp}{dQ} = \frac{Q - a}{b_0 + b_1 Q + b_2 Q^2} p, \quad (4)$$

решением которого является семейство кривых $p(Q)$, используемых в гидрологии.

Коэффициенты a , b_0 , b_1 , b_2 связываются известными формулами с параметрами $\bar{c}$, $\bar{N}$, $G_{\bar{c}}$, $G_{\bar{N}}$, $G_{\bar{c}\bar{N}}$ [1] и, поэтому, имеют четкий физический смысл. Меняя факторы формирования стока (климатические или – подстилающей поверхности бассейнов), можно через параметры $\bar{c}$ и $\bar{N}$, т.е. через осадки $\dot{X}$ и величины, влияющие на коэффициент стока k , оценивать чувствительность к подобным изменениям кривой плотности вероятности.

Так как в практической гидрологии из–за коротких рядов наблюдений ограничиваются 3–4 моментами вероятностных распределений, то

имеет смысл аппроксимировать (26) системой дифференциальных уравнений для начальных моментов m_i [3]:

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

Системы уравнений (5) достаточно для определения всех расчетных гидрологических характеристик: нормы $\bar{Q} = m_1$, коэффициентов вариации $C_v = f(m_1, m_2)$ и асимметрии $C_s = f(m_1, m_2, m_3)$, а также эксцесса $Eh = f(m_1, m_2, m_3, m_4)$. Решение прогностической задачи разбивается на два этапа: по имеющимся (из данных наблюдений или карт) находим m_i и по ним выполняем параметризацию модели (5), т. е. находим $\bar{c}$, $\bar{N}$, $G_{\tilde{c}}$, $G_{\tilde{N}}$, $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$, а затем, меняя (в соответствии с климатическим сценарием) значения $c(\dot{X}, T)$ и $N(\dot{X})$, находим прогнозные (точнее сценарные) значения моментов $m_i^{\text{пр}}$. По ним вычисляем прогнозные расчетные характеристики, строим прогнозные распределения $p^{\text{пр}}(Q)$ и находим обеспеченные значения $Q_{P\%}^{\text{пр}}$ отличающиеся от фактических учетом климатических изменений за период эксплуатации проектируемого сооружения.

Ситуацию можно упростить [3]:

- На практике четвертый момент не используется, а в отношении коэффициента асимметрии целесообразнее выбрать соотношение C_s/C_v .

- Климатические сценарии носят квазистационарный характер, т.е. выделяется временной промежуток, например в 20 лет, и для него указываются характеристики метеоэлементов. Другой набор – для следующего интервала, и т. д. Таким образом, для каждой «ступеньки» процесс форми-

рования многолетнего стока можно рассматривать как статистически стационарный, т.е. можно считать что $dm_i / dt \approx 0$.

Таким образом, система (5) сводится к двум алгебраическим уравнениям для m_1 и m_2 в которых присутствует только $a = 2\bar{N} / 2\bar{c}$ и $b_0 = -G_{\tilde{N}} / 2\bar{c}$. Рассматривая систему (5) в полном объеме, приходится «замораживать» три параметра, характеризующих интенсивности шумов ($G_{\tilde{c}}, G_{\tilde{c}\tilde{N}}, G_{\tilde{N}}$). В случае же сделанных только что допущений – только один $G_{\tilde{N}}^{\text{пр}} = G_{\tilde{N}}$.

Согласно сделанным упрощениям, система (5) упрощается до двух простых формул:

$$-\bar{c}m_1 + \bar{N} = 0, \quad (6)$$

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

Причем, так как $\tau = 1$, то $\bar{c} = 1/\bar{k}$, $\bar{N} = \bar{\dot{X}}$. Сначала, зная m_1 , m_2 и $\dot{X}$ находим $\bar{c}$ и $G_{\tilde{N}}$. Затем, необходимо определить прогнозное значение коэффициента стока. Используется выражение для коэффициента стока $k = \bar{Q} / \dot{X} = 1 - \bar{E} / \bar{\dot{X}}$, полученное из уравнения водного баланса для замкнутых речных водосборов ($\bar{Q} = \bar{\dot{X}} - \bar{E}$). Коэффициент стока связывается с параметрами, которые фигурируют в климатических сценариях ($\bar{T}^\circ \text{C}$ и $\bar{\dot{X}}$), путем использования формулы Н.А. Багрова ($E = f(\dot{X}, E_0)$ (здесь E_0 – испаряемость) и Л. Тюрка ($E_0 = f(T)$)) [3]:

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

Согласно этой формуле рассчитывается прогнозное значение коэффициента стока $k_{\text{пр}}$. В новом климате величина $G_{\tilde{N}}$ останется прежней, так как в сценарии нет информации о возможном изменении дисперсии осадков. Используя систему (28), находим прогнозные значения начальных моментов $m_1^{\text{пр}}$, $m_2^{\text{пр}}$, а затем по известной формуле $C_v = \sqrt{\mu_2} / m_1 = \sqrt{m_2 - m_1^2} / m_1$ (здесь μ_2 – второй центральный момент) находим прогнозное значение коэффициента вариации $C_v^{\text{пр}}$.

1.2 Ретроспективные долгосрочные прогнозы для Российских бассейнов

Годовой сток в большей степени, чем другие виды многолетнего стока, отвечает модели формирующего линейного фильтра (2) и соответствующему упрощенному варианту (6) уравнения ФПК (3) для возможности учета климатических сценарных характеристик при оценке проектных расходов (модулей, слоев) заданной обеспеченности. Это «скользяще–непрерывный» процесс, и такие параметры модели, как коэффициент стока и время релаксации достаточно адекватны характеру годового стока.

Модель, представленную в разделе 1.1, трудно опровергнуть какой-либо дедуктивной аргументацией. Однако все равно возникает вопрос: где экспериментальные данные, подтверждающие ее дееспособность. Причем применимость семейства Пирсона (решения модели) для статистического описания рядов стока вряд ли кому-либо надо доказывать. Защищать надо возможность «замораживания» коэффициентов модели ($G_{\tilde{C}}$, $G_{\tilde{N}}$ и т. д.) при оценке по ней расчетных гидрологических характеристик в условиях нового климата. Такая работа была проделана [4]. Не останавливаясь подробно на ее методологии (выявление рядов, неоднородных по норме осад-

ков и перекрестный прогноз кривых плотности вероятности по изложенной в разделе 1.1 методике), приведем окончательные результаты.

На рисунке 1, а приведен пример используемой информации. Для оценки расхождения ординат фактической и прогнозной кривых обеспеченности (рисунок 1, б) использован критерий Колмогорова. Проверена нулевая гипотеза об их соответствии. В данной ситуации важен вопрос об уровне значимости, т. е. значении вероятности, которое может иметь практически невозможное событие. Его появление указывает на неправильность принятия нулевой гипотезы с вероятностью, не превышающей выбранный уровень значимости. При этом с вероятностью, равной выбранному уровню значимости, можно отвергнуть нулевую гипотезу, хотя она может оказаться правильной (совершить ошибку первого рода). В противном случае, допустив малый уровень значимости, можно принять неправильную альтернативную гипотезу (совершить ошибку второго рода). От ошибок полностью избавиться нельзя, можно уменьшить риск совершения ошибки одного рода за счет увеличения ошибки другого рода. С уменьшением уровня значимости уменьшается вероятность забраковать нулевую гипотезу, когда она верна, но увеличивается вероятность ее принятия, когда она неверна.

Оправдываемость прогнозов оценена на 5, 10 и 20 %-ном уровнях значимости. В таблице 1 приведены абсолютное и относительное число оправдавшихся прогнозов по всей территории СНГ и отдельно для увлажненных ($\bar{X} > 450$ мм) и засушливых ($\bar{X} < 450$ мм) районов. Данные таблицы 1 указывают на правомерность гипотезы квазистационарности, особенно для увлажненных районов, хотя модель можно еще усовершенствовать, сделав ее коэффициенты изменяющимися.

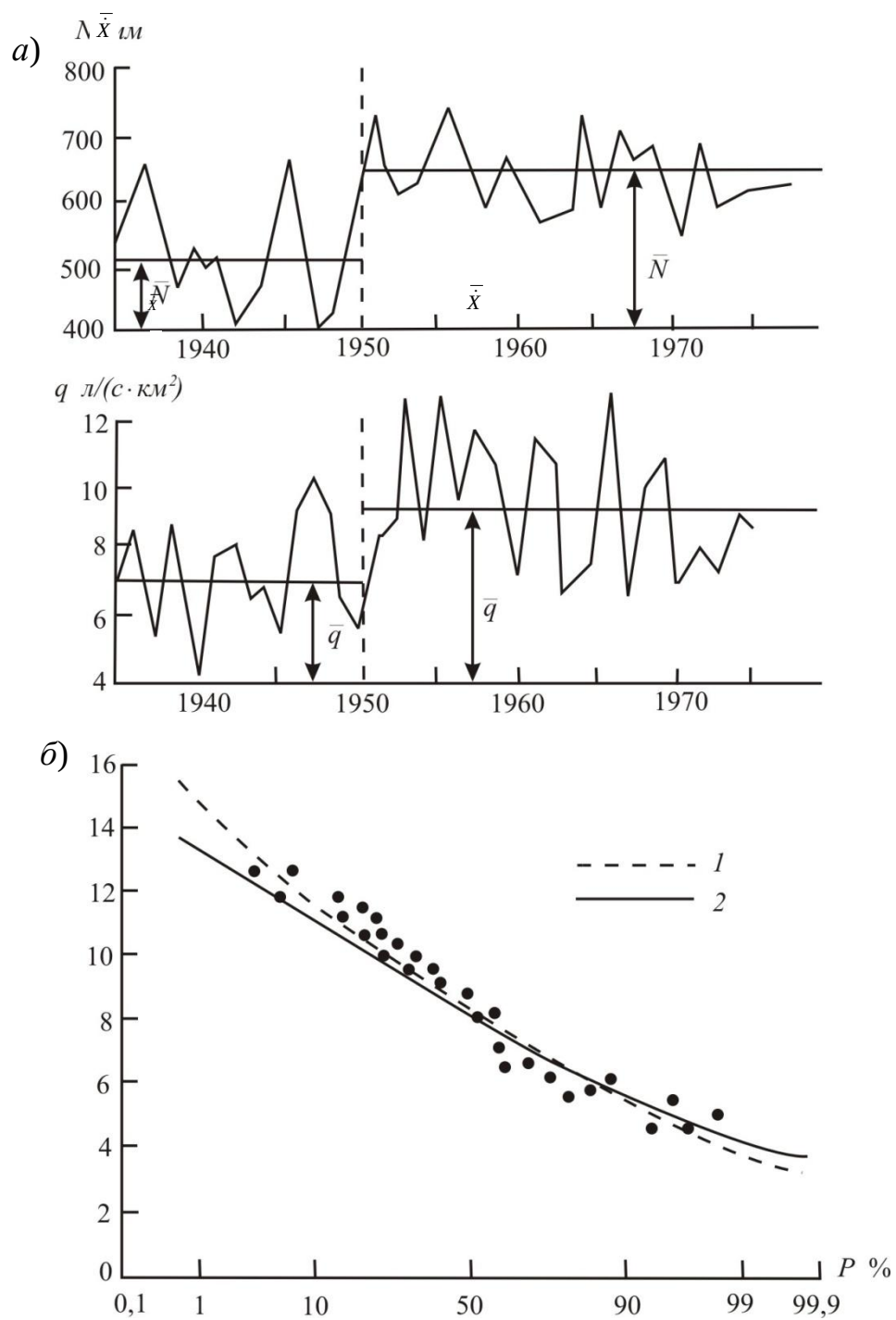


Рисунок 1 – Хронологические графики гидрологических характеристик (а) и кривые обеспеченности стока (б) р. Сухоны у г. Тотьма (1 – фактическая, 2 – прогнозная).

Таблица 1 – Итоговые результаты прогнозов [4]

Район	Общее число прогнозов	Число оправдавшихся прогнозов при уровне значимости		
		5 %	10 %	20 %
Территория СНГ в целом	214	170/79,4	161/75,2	145/67,8
Увлажненный	151	125/82,8	120/79,4	108/74,5
Засушливый	63	45/71,4	41/66,0	37/58,7
В знаменателе – процент общего числа прогнозов.				

1.3 Постановка задачи исследований

Климатическая система Земли охватывает атмосферу, океан, сушу, криосферу (лед и снег) и биосферу. Климат постоянно меняется. Паводки стали наблюдаться даже в тех местах, где дождь редкое событие. Между тем, общий объем воды в крупнейших бассейнах реки Нигер, озера Чад и реки Сенегал в Африке сократился на 40–60 %.

Наблюдается явное увеличение сильных и экстремально сильных явлений, связанных с осадками, наводнения и засухи, нередко сопровождающиеся гибелью урожая и лесными пожарами стали более частыми, причем это нельзя объяснить ростом численности населения планеты или «освоением» новых земель.

Одним из наиболее важных последствий изменения климата является изменение гидрологического режима рек и озер, что существенно влияет на отрасли экономики. Поэтому тема настоящей работы является актуальной и своевременной.

Для решения проблемы надежного вероятностного описания процесса формирования стока и сценарной оценки его была разработана на кафедре гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ методика сверхдолгосроч-

ного прогнозирования вероятностных характеристик речного стока и методики учета испарения совместно со стоком. Эти методики позволяют получить фактические и прогнозные значения характеристик годового стока, а также информацию о поведении водного режима рек, озер, водохранилищ при учете испарения, подавая на входе значение нормы осадков для центра водосбора.

Данная магистерская диссертация посвящена учету испарения при вероятностной оценке гидрологического режима рек Африки, а также ретроспективным долгосрочным прогнозам вероятностных характеристик годового стока Африки, т. е. прогноз на будущем и сравнение с прошедшим, чтобы убедиться в эффективности методики для рек Африки.

В связи с целью работы необходимо решить следующие задачи:

- сформировать базу данных по расходам воды африканских водосборов с продолжительными рядами наблюдений;
- изучить методику долгосрочных изменений вероятностных характеристик стока в условиях климатической и антропогенной изменчивости;
- сделать апробацию методики оценки гидрологических последствий изменения климата на африканских водосборах;
- сгенерировать ряды испарения;
- построить двумерные плотности вероятности и рассчитать условные обеспеченные расходы воды;
- сравнить условные и безусловные обеспеченные значения расходов воды.

2 ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ АФРИКИ

2.1 Гидрологическая информация

Информация о гидрологических характеристиках была получена из Германского центра по окружающей среде по специальному запросу, составленному от имени РГГМУ.

Таблица 2 – Расчетные формулы для определения нормы годового стока

Характеристика стока	Обозначение	Размерность	Расчетная формула
Средний многолетний расход воды	$\bar{Q}$	м ³ /с	$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{Q^i}{n}$
Средний многолетний модуль стока	$\bar{q}$	л/с км ²	$(\bar{Q}/F)10^3$
Средний многолетний слой годового стока	$\bar{h}$	мм	$31,5(\bar{Q}/F)10^3$
F – площадь водосбора, км ² ; n – длина ряда.			

В таблице 3 представлена информация о гидрологических характеристиках выбранных речных бассейнов Африки.

В таблице 3 видно, что большинство водосборов имеют полизональные площади. Это связано с тем, что работе используются длинные ряды, а продолжительные ряды наблюдений встречаются на крупных водотоках. Средний модуль стока равняется 3,94 л/с·км².

Таблица 3 – Гидрологические характеристики выбранных речных бассейнов Африки

№	Река – Пост		Код Поста	F , км ²	Период наблюдений	Длина ряда, n	$Q_{\text{ср}}$, м ³ /с	h , мм	q , л/с км ²
1	Niger	Koulikoro	1134100	120000	1907–1990	84	1407	369	11,7
2	Niger	Dire	1134700	340000	1924–1992	68	1003	93	2,95
3	Senegal	Bakel	1812500	218000	1904–1989	84	846	122	3,88
4	Mono	Athieme	1732100	21575	1944–1989	46	147	214	6,80
5	Orange	Vioolsdrif	1159100	866486	1935–2001	67	217	8	0,25
6	Vaal	ElandsfonteinEngelbrechtsdrift	1159800	38564	1915–1993	74	54,3	44	1,41
7	Klip	Delangesdrift	1159900	4152	1906–2001	96	6,28	48	1,51
8	Bree	CeresToekenGeb.	1160300	657	1923–2001	79	3,40	163	5,17
9	Doring	ElandsDrift – Aspoot	1160320	6895	1923–2000	78	8,43	39	1,22
10	Groot–Vis	BrandtLegtePiggot'sBridge	1160510	23067	1935–2000	66	6,12	8	0,27
11	Mtamvuna	Gundrift	1160650	728	1951–2000	50	5,38	233	7,39
12	Mzimkulu	Fp 1609030 TheBanks	1160680	545	1949–2000	52	7,63	441	14,0
13	Slangrivier	Vlakdrift	1160800	683	1947–1993	47	3,09	142	4,52
14	Megalies	Scheerpoort	1196350	1171	1922–2001	80	0,96	26	0,82
15	Incomati	Hooggenoeg	1197300	5540	1909–2001	93	14,1	80	2,55
16	Chari	Ndjamena(FortLamy)	1537100	600000	1933–1990	56	1119	59	1,86
17	Okavango / Cubango	Mohembo/Mtaembo	1357100	410000	1933–2000	68	299	23	0,73

После распада Гондваны Африка долгое время оставалась преимущественно областью внутреннего стока. Еще в плювиальные эпохи четвертичного периода, когда материк был обводнен значительно сильнее, чем теперь, реки впадали в пресноводные озера в северной Калахари, во впадине Конго, Западной Сахаре. Огромных размеров достигало Палеочадское озеро, несколько озер существовало на Восточно–Африканском плоскогорье и на востоке Судана.

Формированию внешнего стока способствовали поднятия краев и внутриматериковых блоков африканского фундамента. В период действия эрозионных циклов на склонах плато и плоскогорий, обращенных к океанам и обрамлявших внутренние впадины, были заложены новые реки, перехватившие древние речные системы. Следы перехватов обнаруживаются чрезвычайно отчетливо. Нижние отрезки Конго, Нигера, Замбези, Оранжевой и других крупных рек, выходящих из глубин материка, имеют невыработанные профили с порогами и водопадами. Порожистые отрезки имеются и в средних течениях рек, там, где они спадают в котловины с внутренних плоскогорий. Таким образом, для современных рек материка чрезвычайно характерно чередование отрезков древних, пологих профилей русла и широких долин и молодых крутых профилей и узких долин. Поэтому реки, особенно крупные, непригодны для судоходства на всем их протяжении, но обладают огромными запасами гидроэнергии, уступая в этом отношении только азиатской части Евразии. На долю рек Африки приходится около 1/3 гидроресурсов капиталистических и развивающихся стран.

Почти все реки Африки имеют дождевое и в меньшей степени грунтовое питание. Снеговое и ледниковое питание получают лишь немногие реки, берущие начало в горах выше снеговой границы (высшие вершины Атласских гор, Рувензори, Килиманджаро и др.).

Распределение речной сети и стока неравномерно и является функцией многих факторов, среди которых главную роль играют соотношение

осадков и температур, рельеф и литология, характер почвенно-растительного покрова.

Структура водного баланса неблагоприятна для формирования стока с материка. По объему выпадающих осадков ($22\,300\text{ км}^3$) Африка уступает Южной Америке и Азии. В расходной части баланса потеря осадков на испарение в 4 раза превышает их долю, формирующую сток. Его общий объем покрывает лишь $1/8$ дефицита влаги, превышающего $38\,000\text{ км}^3$. Поэтому по общему объему стока (4600 км^3) Африка (с островом Мадагаскар) значительно уступает Азии и Южной Америке.

Наибольших величин сток достигает в районах избыточного увлажнения. Это почти все экваториальное побережье Гвинейского залива, впадина Конго, а также восточная часть Мадагаскара. Здесь слой стока достигает $600\text{--}400\text{ мм}$, а в местах выходов кристаллических пород и развития латеритных кор, препятствующих инфильтрации, возрастает до 1500 мм и более. В субэкваториальных широтах по мере сокращения годовых сумм осадков, нарастания тепла и интенсивности испарения слой стока быстро уменьшается и достигает 50 мм и менее в тропиках. В субтропиках, особенно в областях средиземноморского климата, где происходит снижение температур в зимний влажный сезон, сток вновь несколько увеличивается.

К областям внешнего стока относится около $2/3$ площади Африки. Благодаря тому, что континентальный водораздел проходит по восточной окраине материка, более $1/3$ его площади принадлежит к бассейну Атлантического океана (таблица 4).

Режим стока подчинен режиму выпадения осадков только на нетранзитных реках. В экваториальном климате реки полноводны круглый год, в остальных климатических поясах сток имеет сезонный характер и достигает наибольших величин летом и осенью, в периоды дождей и непосредственно после них. Только в средиземноморских областях максимум стока сдвигается за зимние месяцы.

Водность рек и густота речной сети убывает с приближением к поясам тропического климата. Области материка, лежащие в аридных и полупустынных тропиках, почти целиком принадлежат бассейнам внутреннего стока. Они охватывают около $\frac{1}{3}$ Африки, площадь свыше 9 млн. км². К ним относятся Сахара, отдельные районы Эфиопско-Сомалийского региона, некоторые грабены Восточной Африки и значительная часть Калахари. В таких областях реки эпизодические, и кратковременный сток по обычно сухим руслам происходит после многолетнего перерыва.

Таблица 4 – Распределение площади Африки по водосборным бассейнам океанов

Наименование бассейна	Площадь, млн. км ²	Процент от площади материка
Бассейн Атлантического океана	10,5	36,05
Бассейн Индийского океана	5,4	18,48
Бассейн Средиземного моря	4,5	14,88
Итого.	20,4	69,31

Внешний сток Африки осуществляется главным образом пятью главными реками – Конго (Заир), Нилом, Нигером, Замбези и Оранжевой. Их бассейны охватывают более $\frac{1}{3}$ площади материка (таблица 5). Эти реки пересекают несколько климатических зон, относятся к транзитным и имеют сложный режим стока.

Конго (Заир) – самая полноводная река восточного полушария, вторая по длине в Африке. Ее исток – река Луалаба – начинается на плоскогорье в южной Шаббе и течет на север в направлении стока древних речных артерий. Свое название она получает ниже города Кисангани.

Возможно, что в палеогене древнее Конго соединялось с Пра-Нилом. В неогене река впадала в Палео-Чадское озеро, после поднятия

широтного порога плоскогорья Азанде – в озеро Бусира во впадине Конго. Озеро было спущено в результате сложных перехватов в приатлантической части современного бассейна реки. Вследствие резкого понижения базиса эрозии до уровня океана в систему Конго (Заир) были включены реки Чамбеши, Луапула и Лувуа и соединяющие их озера. В результате площадь бассейна Конго (Заир) увеличилась на 1/4 млн. км². Наконец, несколько тысяч лет тому назад в бассейн реки были включены озера Киву и Танганьика (через реку Лукуга). Это произошло вследствие подпруживания прежнего стока на север в разломах Танганьики и Киву лавами вулканов Вирунга.

Таблица 5 – Крупнейшие реки Африки

Название рек	Длина, км	Площадь бассейна, тыс. км ²	Средний годовой сток в устье, км ³
Нил	6671	2870	73,1
Конго (Заир)	4320	3691	1414
Нигер	4160	2092	268
Замбези	2660	1330	108
Оранжевая	1860	1020	25

Средний годовой сток Конго (Заир) вдвое превышает сток Миссисипи и более чем в 15 раз превосходит сток Нила. Ежегодный слой стока с площади бассейна (330 мм) почти в два раза выше, чем слой стока со всей поверхности материка. Главная особенность реки – исключительная равномерность расходов воды по сезонам. У Киншасы соотношение средних колебаний расходов при высоком и низком уровнях реки равно 1,75 (54 тыс. м³/с в декабре и 31 тыс. м³/с в августе), в то время как у Амазонки оно больше 3, а у Нила приближается к 16. Такое соотношение наблюдается лишь на немногих реках земного шара и объясняется главным образом

равномерным выпадением осадков в экваториальном секторе бассейна, а также расположением системы в обоих полушариях. В нижнем течении при средних расходах около 39 тыс. м³/с наибольшие расходы бывают в ноябре–январе за счет прихода паводковых вод из северного полушария и подъема воды в главном русле, наступающего после осенних (сентябрь) зенитальных дождей на притоках в южном полушарии (река Ква и др.).

Твердый сток Конго (Заир) невелик из-за залесенности бассейна и слабого уклона русла на дне обширной впадины. Устье реки имеет форму эстуария и продолжается ниже уровня океана глубоким каньоном, врезанным в узкий шельф и материковый склон.

Нил – первая по длине река в мире и пятая по площади бассейна (ниже впадения Атбары она не получает притоков на протяжении 2700 км). Нил теряет огромное количество воды на испарение, инфильтрацию и орошение. Объем стока в устье реки в три раза меньше стока, формирующегося на площади бассейна.

Нил начинается на Восточно-Африканском плоскогорье, его истоки лежат в южном полушарии (2°17' ю. ш.). Главный исток – река Кагера – впадает в озеро Виктория. Далее Нил получает водоезер Кьога, Эдуард и Мобуту–Сесе–Секо и спускается с плоскогорья на равнины Восточного Судана (Белый Нил). Здесь река разбивается на рукава и протоки, окруженные болотами, и принимает воды притоков Бахр-эль-Газаль и Собат. Вдоль его берегов тянутся заросли камышей и папируса. В разливы островки этой водной растительности, называемые сэддами, отрываются от илистого грунта и медленно движутся по течению. Они часто закупоривают русло и мешают судоходству.

У Хартума Белый Нил сливается с Голубым Нилом, который вытекает из озера Тана на Эфиопском нагорье и получает название Нил. На севере Судана Нил принимает свой последний приток Атбару. Ниже Каира река, образуя дельту, почти равную по площади Крымскому полуострову,

достигает Средиземного моря двумя рукавами, перегороженными песчаными косами. Единая система Нила заложилась путем слияния озерно-речных систем Восточно-Африканского плоскогорья, востока суданских равнин и реки, протекавшей в ливийско-египетском прогибе Африканской платформы. На отрезке от Хартума до Асуана долина Нила эпигенетического заложения. Она врезается до кристаллического основания платформы, пересекает ее в узкой долине, преодолевая шесть порогов.

Сток Нила складывается из стока Собата, Голубого Нила, Атбары (84 %) и Белого Нила (16 %). Белый Нил теряет около половины воды на испарение в болотах области сэддов. Болота играют роль регулятора стока. Сток Голубого Нила, Собата и Атбары подвержен резким сезонным колебаниям. Расходы этих рек достигают максимума летом, когда на Эфиопском нагорье выпадают обильные дожди. Зимой сток Голубого Нила и Собата сильно уменьшается, Атбара распадается на цепочки озер, и питание главной реки происходит за счет Белого Нила и грунтовых вод. В нижнее течение реки паводковые воды приходят в конце лета, в начале осени. Значительная их часть теряется на испарение с поверхности крупных водохранилищ ($7 \text{ км}^3/\text{год}$ с зеркала водохранилища Насер) и разбирается на орошение. Только в дельте в оросительную сеть уходит ежегодно 22 км^3 воды.

Нигер занимает третье место среди других рек Африки по длине, площади бассейна и объему годового стока. На пути от истоков до устья на побережье Гвинейского залива он описывает дугу, вершина которой почти достигает Сахары. Современная река образовалась путем перехвата Пра-Нигера более молодыми реками, текущими на юго-восток. Перехват произошел в районе Томбукту, в месте разветвления дельты древней реки, впадавшей в плейстоцене в «Сахарское море» на юге Западной Сахары. Верховья и низовья Нигера лежат в субэкваториальных и экваториальных областях, в полосе обильных летних дождей, где происходит питание реки.

Среднее течение реки подступает к Сахаре, и на этом отрезке река теряет очень много воды. Расходы реки в верхнем и нижнем течении начинают возрастать с июня и достигают пика в сентябре. В среднем течении паводковые воды широко разливаются и затопляют рукава и протоки древней, так называемой «внутренней» дельты, но часть паводка все же достигает нижнего течения, где с февраля по апрель расходы вновь увеличиваются. Нигер образует в устье огромную дельту, одну из самых крупных в мире.

Реки Африки используются для орошения и обводнения, но еще далеко недостаточно. Течения крупных рек зарегулированы плотинами, поэтому значительная доля речных вод сосредоточена в водохранилищах. На главных реках сооружено 12 водохранилищ, общий объем воды которых достигает 15 км³. К крупнейшим водохранилищам относятся Насер на Ниле, Кариба и Кабора-Басеана реке Замбези, Вольта на одноименной реке.

Озера. Почти все крупнейшие озера Африки лежат в тектонических впадинах на Восточно-Африканском плоскогорье. Они располагаются на разных уровнях, большинство имеет большие глубины и обрамлены крутыми склонами. Котловины озер Танганьика и Ньяса – криптодепрессии, Танганьика – второе по глубине озеро в мире после озера Байкал (таблица 6).

Таблица 6 – Главнейшие озера Африки

Озера	Площадь, км ²	Высота абс., м	Наиб. глубина, м
Виктория	68000	1134	80
Танганьика	32000	773	1470*
Ньяса	30800	472	706
Рудольф	8500	375	73
Мобуту–Сесе–Секо– (Альберт)	4200	680	48

Озера	Площадь, км ²	Высота абс., м	Наиб. глубина, м
Киву	2700	1462	485
Эдуард	2000	910	114

Озеро Виктория – самое большое в Африке, второй по площади (после озера Верхнего в Северной Америке) пресноводный водоем в мире. Оно мелководно, занимает древнюю эрозионную котловину, западный край которой осложнен сбросами, а северный образован лавовым барьером.

Уровни озер Восточной Африки подвержены многолетним колебаниям, что, по всей вероятности, связано с изменением солнечной активности и многолетними колебаниями климата.

На остальной территории Африки озер мало. Реликтовым водоемом является озеро Чад. Глубины озера ничтожны (наибольшие 7 м), площадь в сухое время года около 10 тыс. км², после дождей и разливов питающих озеро рек Шари – Логоне возрастает почти вдвое. Чад имеет подземный сток в котловину Боделе, поэтому его воды лишь солоноватые.

Озеро Тана на Эфиопском нагорье подпружено лавовым потоком. Цепочки небольших соленых озер, большей частью соленых, лежат в тектонических впадинах Эфиопии и Восточно–Африканского плоскогорья. В засушливых и пустынных областях – на высоких плато между хребтами Атласских гор, вдоль их южного подножия в Тунисе, а также в Южной и Восточной Африке есть пересыхающие озера, покрывающиеся в сухое время года коркой солей.

Огромное значение для пустынь и полупустынь имеют грунтовые и подземные воды. Грунтовые воды имеют главным образом линейное распространение в виде подрусловых потоков эпизодических рек. Крупные артезианские бассейны особенно важны в Сахаре и в безводных районах

Южной Африки. В Сахаре пресные или слабо засоленные подземные воды приурочены преимущественно к нижнемеловым континентальным песчаникам. В полупустынях и пустынях Южной Африки подземные воды скапливаются большей частью в трещинах коренных пород, в закарстованных известняках и, предположительно, в песчаниках системы Карру.

Статистическая обработка рядов наблюдений

В исследовании определялись следующие статистические характеристики:

- коэффициенты вариации C_v и асимметрии C_s (соотношение C_s/C_v);
- коэффициент автокорреляции $r(1)$.

Эти характеристики рассчитывались по формулам.

Среднемноголетний расход воды и его среднеквадратическое отклонение:

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}, \quad \sigma_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n}}, \quad \delta_{\bar{Q}} = \frac{C_v}{\sqrt{n}}, \quad (8)$$

где Q_i – расход воды за i -й год;

n – число членов ряда расходов воды (продолжительность ряда);

σ – среднеквадратическое отклонение;

δ – погрешность.

- Коэффициент вариации и его среднеквадратическое отклонение:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i}{\bar{Q}} - 1 \right)^2}{n}}, \quad \delta_{C_v} = C_v \sqrt{\frac{1 + C_v^2}{2n}}. \quad (9)$$

- Коэффициент асимметрии и его среднеквадратическое отклонение:

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i}{\bar{Q}} - 1 \right)^3}{n * C_v^3}, \quad \delta_{C_s} = \sqrt{\frac{6}{n} \left(1 + 6 * C_v^2 + 5 * C_v^4 \right)}. \quad (10)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Статистические характеристики рядов наблюдения за речным стоком

№	Код поста	C_v	C_s	C_s/C_v	$r(1)$
1	1134100	0,28	0,16	0,58	0,65
2	1134700	0,28	−0,04	−0,16	0,87
3	1812500	0,46	0,50	1,08	0,36
4	1732100	0,42	0,62	1,46	0,33
5	1159100	0,78	1,49	1,91	0,21
6	1159800	1,23	3,63	2,95	0,10
7	1159900	0,95	2,74	2,87	0,44
8	1160300	0,49	1,27	2,59	0,36
9	1160320	0,62	1,08	1,73	0,10
10	1160510	1,49	4,40	2,94	0,02
11	1160650	0,47	0,93	1,99	0,25
12	1160680	0,33	0,55	1,64	0,09
13	1160800	0,57	−0,01	−0,02	0,30
14	1196350	1,02	2,26	2,22	0,34
15	1197300	0,37	−0,14	−0,38	0,17
16	1537100	0,48	1,63	3,40	0,26
17	1357100	0,25	0,75	2,96	0,41

Был произведен расчет погрешностей вычисленных статистических характеристик. Результаты представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Погрешности статистических характеристик

№	Код поста	$\delta(q)$	$\delta(C_v)$	$\delta(C_s)$
1	1134100	3,08	9,35	428
2	1134700	3,36	10,3	813
3	1812500	5,01	11,5	84,8
4	1732100	6,26	14,8	87,4

№	Код поста	$\delta(q)$	$\delta(C_v)$	$\delta(C_s)$
5	1159100	9,52	18,0	51,3
6	1159800	14,3	24,2	36,5
7	1159900	9,72	17,7	29,7
8	1160300	5,51	12,3	35,8
9	1160320	7,07	14,3	51,9
10	1160510	18,4	29,1	43,0
11	1160650	6,60	14,9	59,6
12	1160680	4,61	12,5	81,9
13	1160800	8,35	17,3	–
14	1196350	11,4	20,2	43,1
15	1197300	3,79	9,78	251
16	1537100	6,42	14,4	32,6
17	1357100	3,08	10,1	47,0

Погрешность определения коэффициента асимметрии довольно высока, поэтому при прогнозах используется соотношение C_s/C_v .

Разностно-интегральные кривые

В рядах годового стока рек, как правило, наблюдается чередование групп маловодных и многоводных лет, что приводит к образованию так называемых «циклов водности». Один цикл водности включает в себя многоводную и маловодную фазы. Наиболее наглядное представление о циклах колебания годового стока дает разностная интегральная кривая, которая представляет собой график зависимости.

$$\frac{\sum(k_i - 1)}{C_v} = f(t)$$

где k_i – модульный коэффициент, который находится по формуле $k_i = Q_i/Q_{cp}$.

Для построения разностных интегральных кривых заполняются вспомогательные таблицы. Кривые строятся по данным колонок 2 и 6 таблицы 9 (для иллюстрации, на примере реки Мали).

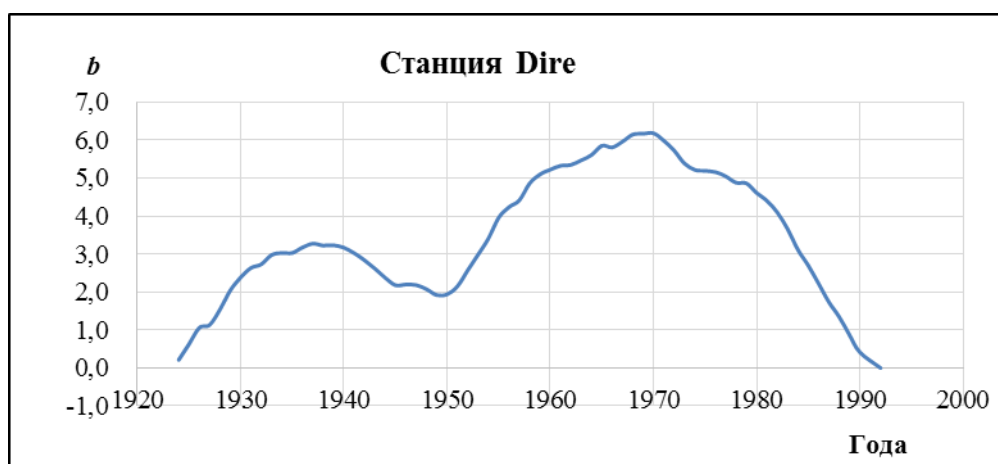
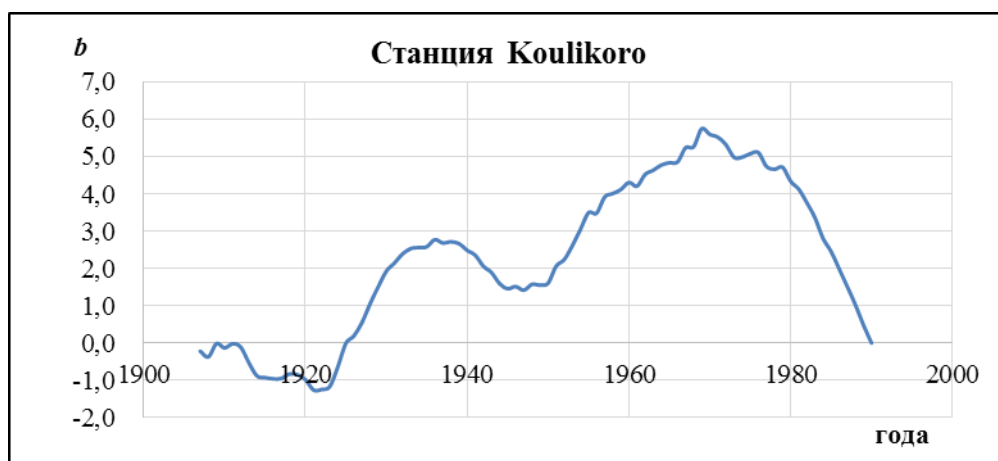
Таблица 9 – Расчет координат разностной интегральной кривой реки Мали

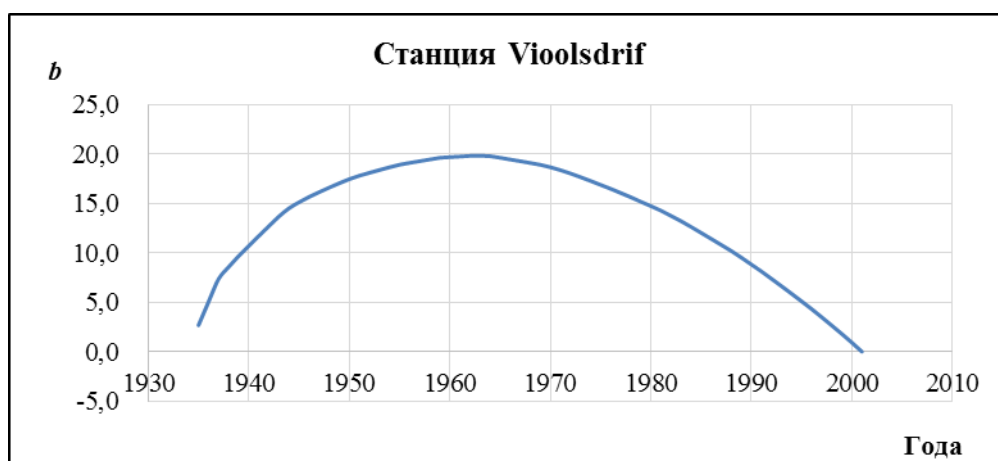
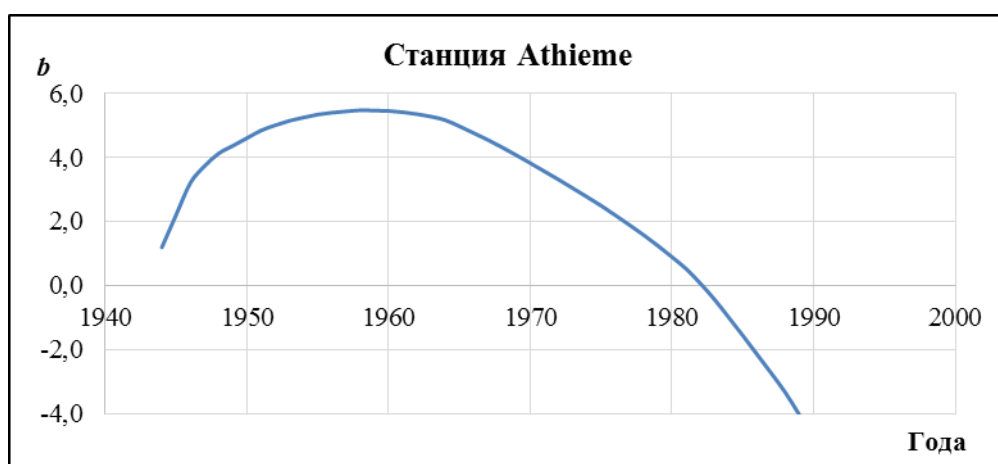
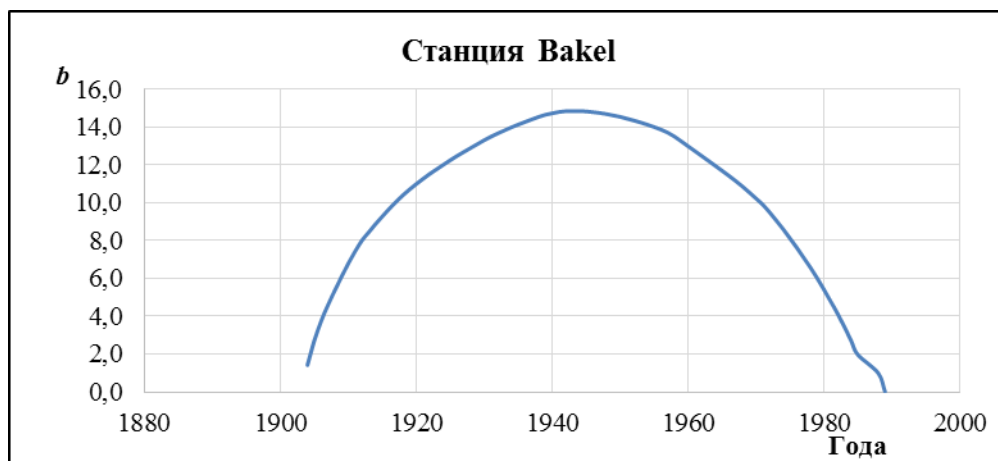
N п/п	Год	Q , м ³ /с	k_i	k_{i-1}	$\Sigma(k_i - 1)$
1	2	3	4	5	6
1	1907	1101	0,78	–0,22	–0,22
2	1908	1190	0,85	–0,15	–0,37
3	1909	1909	1,36	0,36	–0,01
4	1910	1244	0,88	–0,12	–0,13
5	1911	1564	1,11	0,11	–0,02
6	1912	1282	0,91	–0,09	–0,11
7	1913	821	0,58	–0,42	–0,52
8	1914	911	0,65	–0,35	–0,88
9	1915	1340	0,95	–0,05	–0,93
10	1916	1361	0,97	–0,03	–0,96
11	1917	1421	1,01	0,01	–0,95
12	1918	1574	1,12	0,12	–0,83
13	1919	1384	0,98	–0,02	–0,85
14	1920	1216	0,86	–0,14	–0,98
15	1921	1017	0,72	–0,28	–1,26
16	1922	1428	1,01	0,01	–1,25
17	1923	1515	1,08	0,08	–1,17
18	1924	2152	1,53	0,53	–0,64
19	1925	2296	1,63	0,63	–0,01
20	1926	1691	1,20	0,20	0,19
21	1927	1914	1,36	0,36	0,55
22	1928	2119	1,51	0,51	1,06
23	1929	2040	1,45	0,45	1,51
24	1930	1994	1,42	0,42	1,93
25	1931	1715	1,22	0,22	2,14
26	1932	1750	1,24	0,24	2,39
27	1933	1611	1,14	0,14	2,53
28	1934	1448	1,03	0,03	2,56
29	1935	1435	1,02	0,02	2,58
30	1936	1680	1,19	0,19	2,78
31	1937	1279	0,91	–0,09	2,68
32	1938	1454	1,03	0,03	2,72
33	1939	1333	0,95	–0,05	2,66

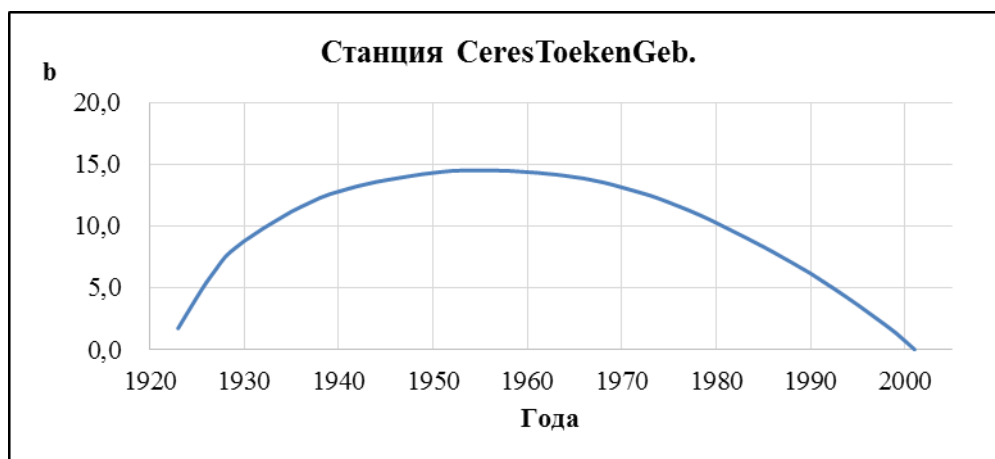
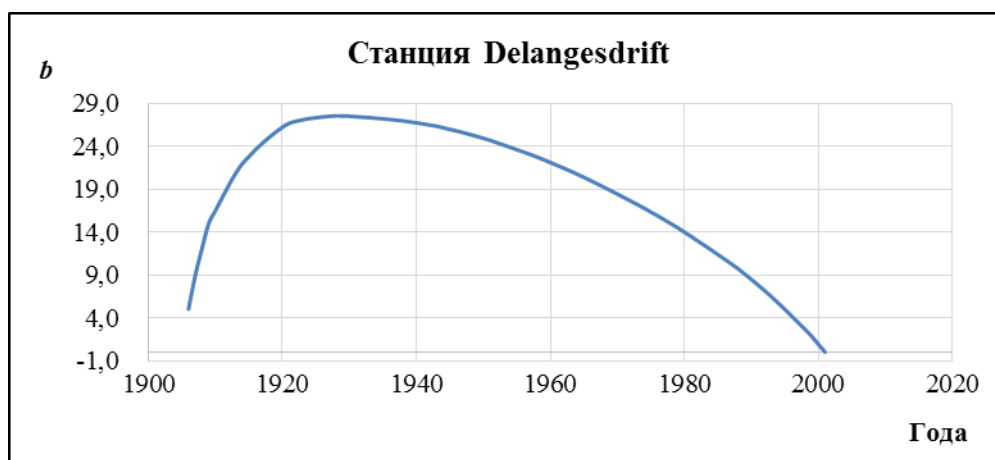
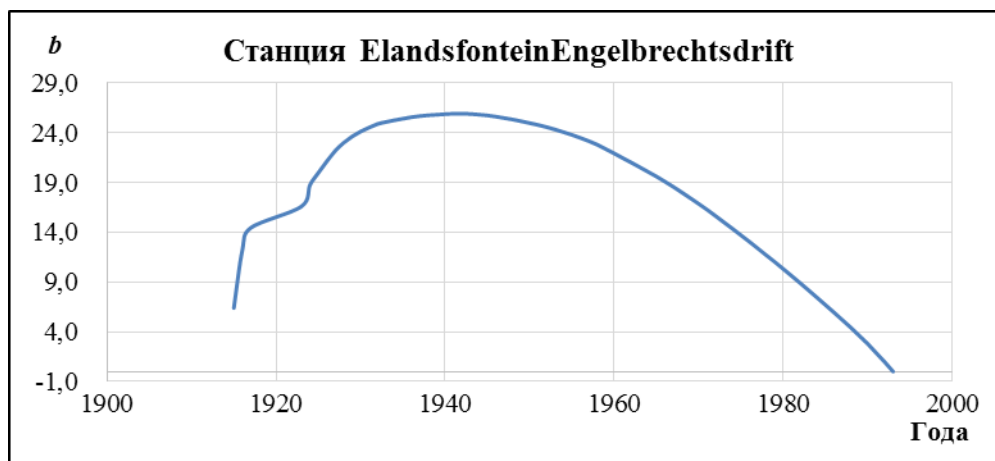
N п/п	Год	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	k_i	$k_i - 1$	$\Sigma(k_i - 1)$
34	1940	1157	0,82	−0,18	2,49
35	1941	1223	0,87	−0,13	2,36
36	1942	992	0,70	−0,30	2,06
37	1943	1172	0,83	−0,17	1,89
38	1944	988	0,70	−0,30	1,60
39	1945	1213	0,86	−0,14	1,46
40	1946	1492	1,06	0,06	1,52
41	1947	1265	0,90	−0,10	1,42
42	1948	1628	1,16	0,16	1,57
43	1949	1383	0,98	−0,02	1,56
44	1950	1475	1,05	0,05	1,60
45	1951	2052	1,46	0,46	2,06
46	1952	1655	1,18	0,18	2,24
47	1953	1932	1,37	0,37	2,61
48	1954	2024	1,44	0,44	3,05
49	1955	2036	1,45	0,45	3,50
50	1956	1391	0,99	−0,01	3,48
51	1957	2014	1,43	0,43	3,92
52	1958	1540	1,09	0,09	4,01
53	1959	1559	1,11	0,11	4,12
54	1960	1674	1,19	0,19	4,31
55	1961	1269	0,90	−0,10	4,21
56	1962	1849	1,31	0,31	4,52
57	1963	1563	1,11	0,11	4,63
58	1964	1605	1,14	0,14	4,77
59	1965	1493	1,06	0,06	4,84
60	1966	1437	1,02	0,02	4,86
61	1967	1944	1,38	0,38	5,24
62	1968	1451	1,03	0,03	5,27
63	1969	2083	1,48	0,48	5,75
64	1970	1192	0,85	−0,15	5,60
65	1971	1304	0,93	−0,07	5,52
66	1972	1121	0,80	−0,20	5,32
67	1973	930	0,66	−0,34	4,98
68	1974	1420	1,01	0,01	4,99
69	1975	1534	1,09	0,09	5,08
70	1976	1451	1,03	0,03	5,11
71	1977	888	0,63	−0,37	4,74
72	1978	1297	0,92	−0,08	4,66
73	1979	1481	1,05	0,05	4,71
74	1980	876	0,62	−0,38	4,34

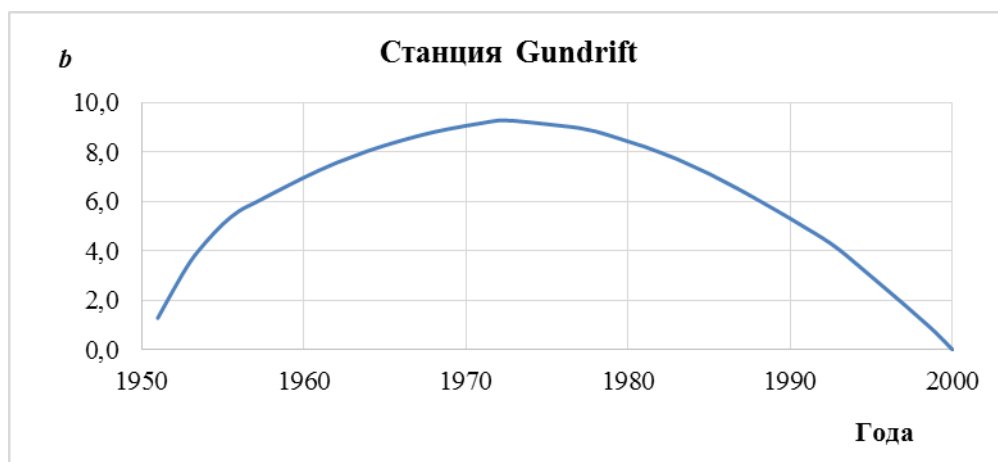
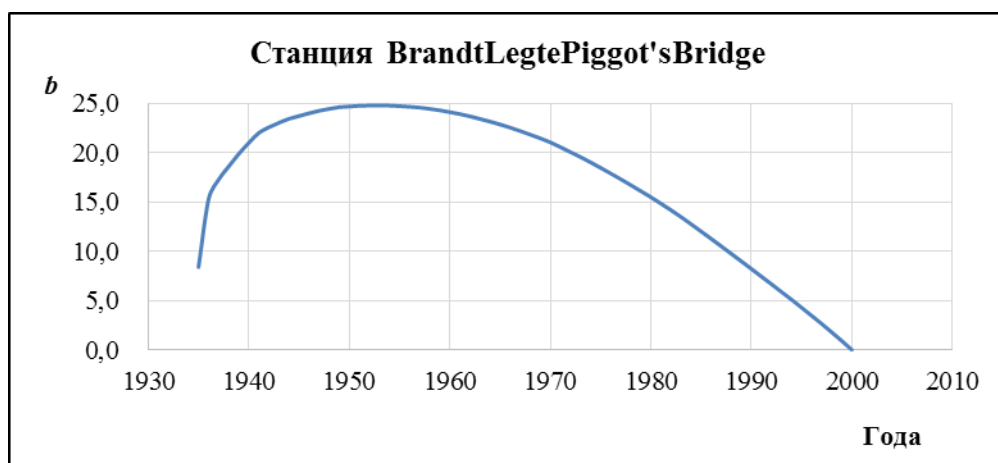
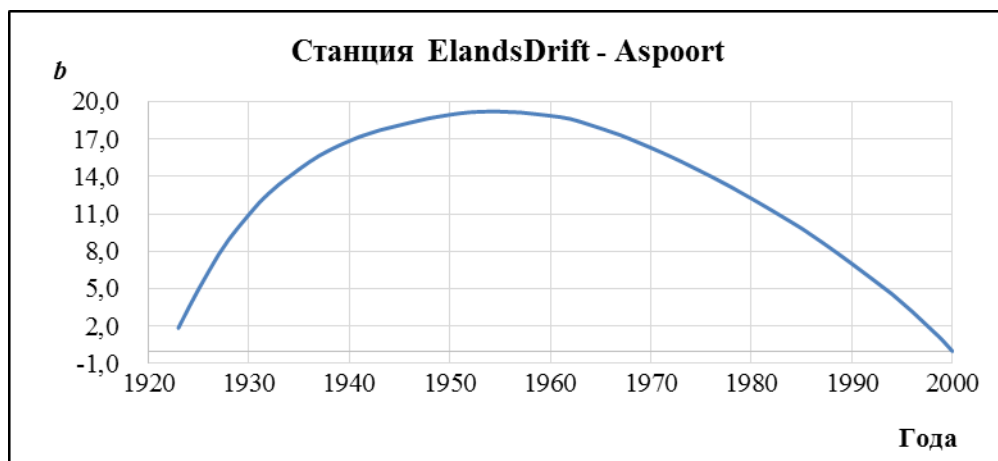
N п/п	Год	Q , м ³ /с	k_i	$k_i - 1$	$\Sigma(k_i - 1)$
75	1981	1108	0,79	-0,21	4,12
76	1982	900	0,64	-0,36	3,76
77	1983	837	0,59	-0,41	3,36
78	1984	633	0,45	-0,55	2,81
79	1985	910	0,65	-0,35	2,46
80	1986	749	0,53	-0,47	1,99
81	1987	739	0,52	-0,48	1,51
82	1988	729	0,52	-0,48	1,03
83	1989	636	0,45	-0,55	0,48
84	1990	729	0,52	-0,48	0,00
Сумма			84,00	0,00	
Сред.			1,00	0,00	

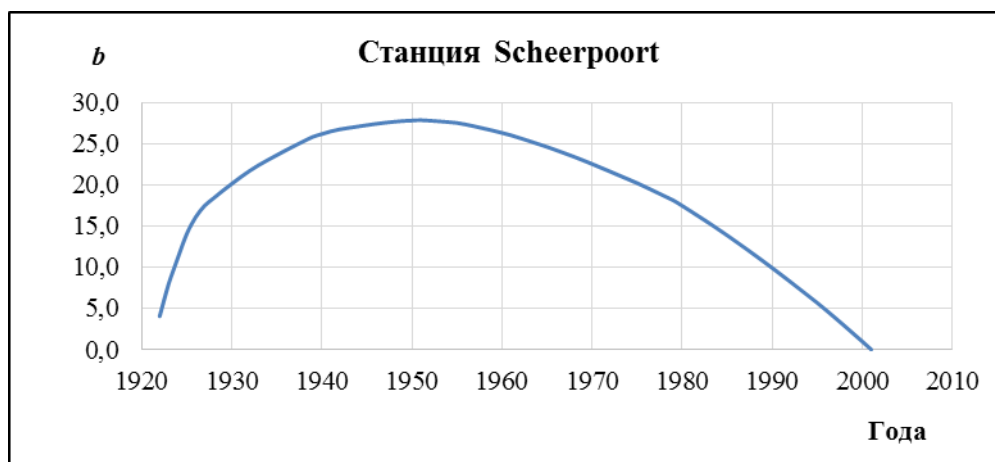
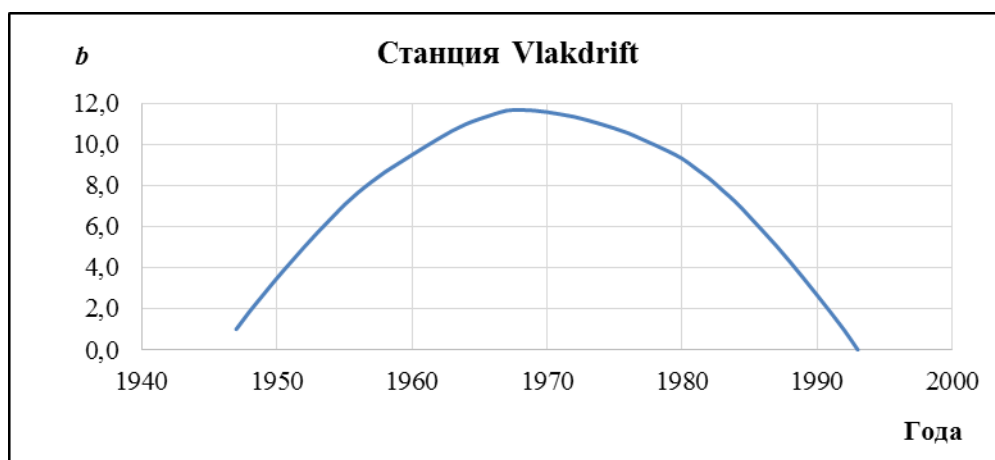
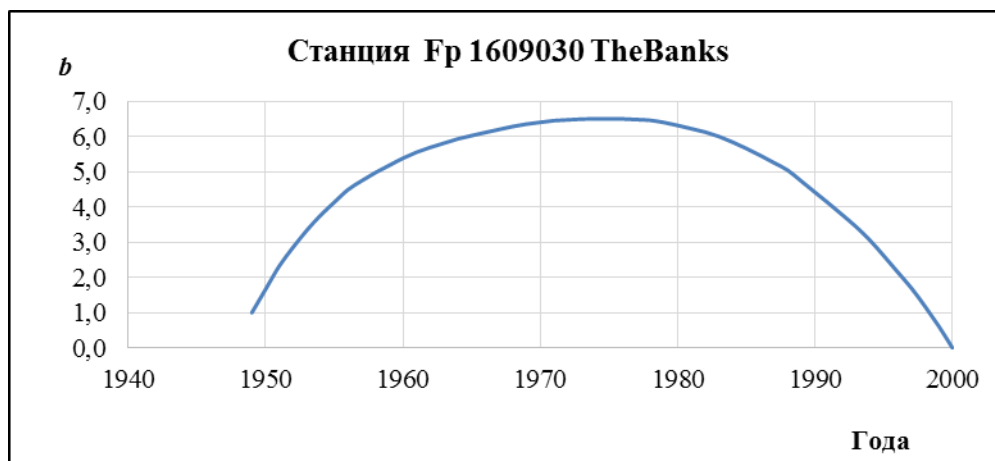
Были построены разностно-интегральные кривые, которые представлены на рисунке 3.











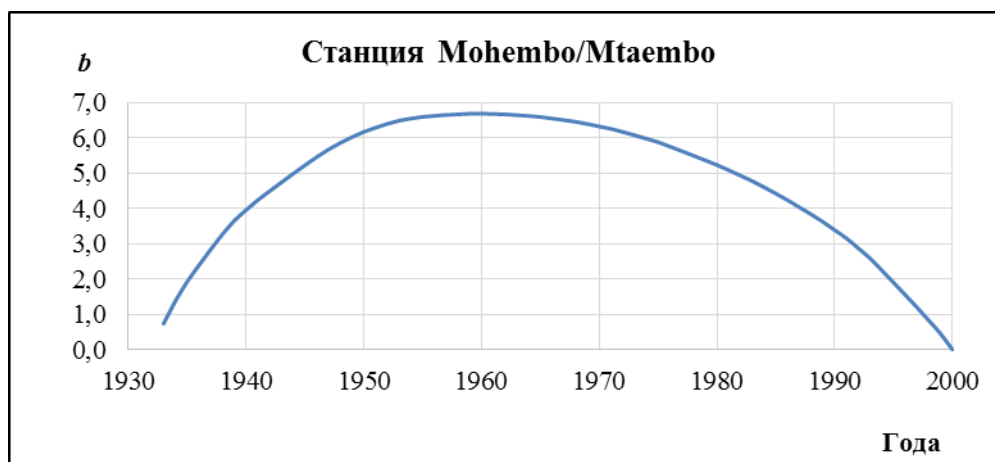
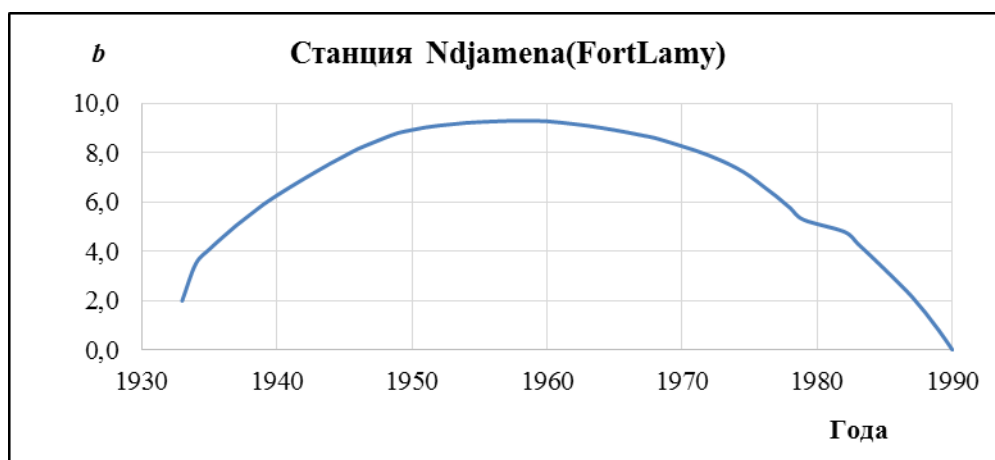
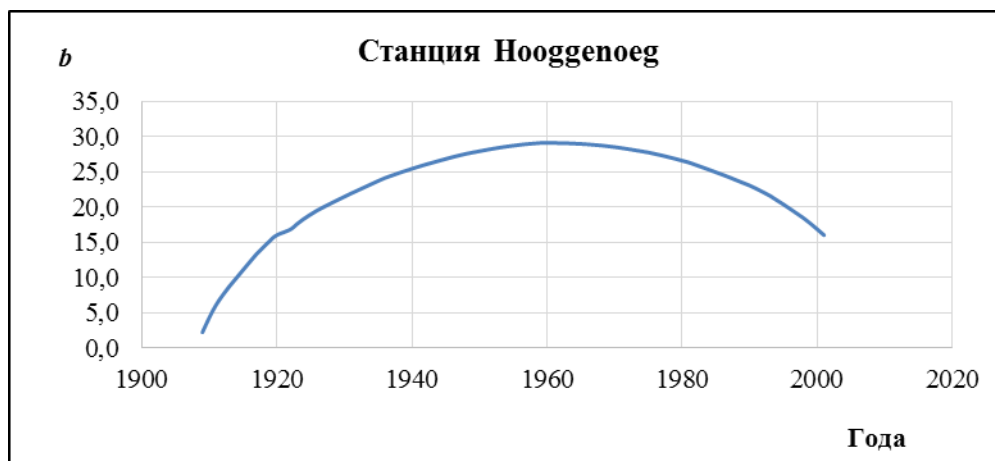


Рисунок 3 – Разносно-интегральные кривые ($b = \Sigma (k_i - 1)/Cv$)

На рисунке 3 видно, что все ряды имеют маловодный и многоводный периоды, что является необходимым условием при статистической обработке рядов.

Проверка однородности

Проверка на однородность производилась по критериям Стьюденту и Фишеру на 2, 5, 10 % уровнях значимости. Результаты показаны в таблице 10. Из нее видно, что по Стьюденту из 17 случаев проверка однородности не опровергается в 13 случаях при 2 % уровне значимости, и 12 при 5% и 10%, а по Фишеру также из 17 – 10 при 2 % уровне значимости, 9 при 5 % и 10 %, проверка не опровергается.

Таблица 10 – Результаты проверки на однородность на различных уровнях значимости (у. з.)

№	Код поста	по Стьюденту			по Фишеру		
		2 % у.з.	5 % у.з.	10 % у.з.	2 % у.з.	5 % у.з.	10 % у.з.
1	1134100	+	+	+	+	+	—
2	1134700	—	—	—	—	—	—
3	1812500	—	—	—	—	—	—
4	1732100	+	+	+	+	+	+
5	1159100	—	—	—	+	+	+
6	1159800	+	+	+	—	—	—
7	1159900	+	+	+	+	+	+
8	1160300	+	+	+	+	—	—
9	1160320	+	—	—	+	+	+
10	1160510	+	+	+	+	+	+
11	1160650	+	+	+	+	+	+
12	1160680	+	+	+	—	—	+
13	1160800	+	+	+	—	—	—
14	1196350	+	+	+	+	+	+
15	1197300	+	+	+	—	—	—
16	1537100	—	—	—	—	—	—
17	1357100	+	+	+	+	+	+

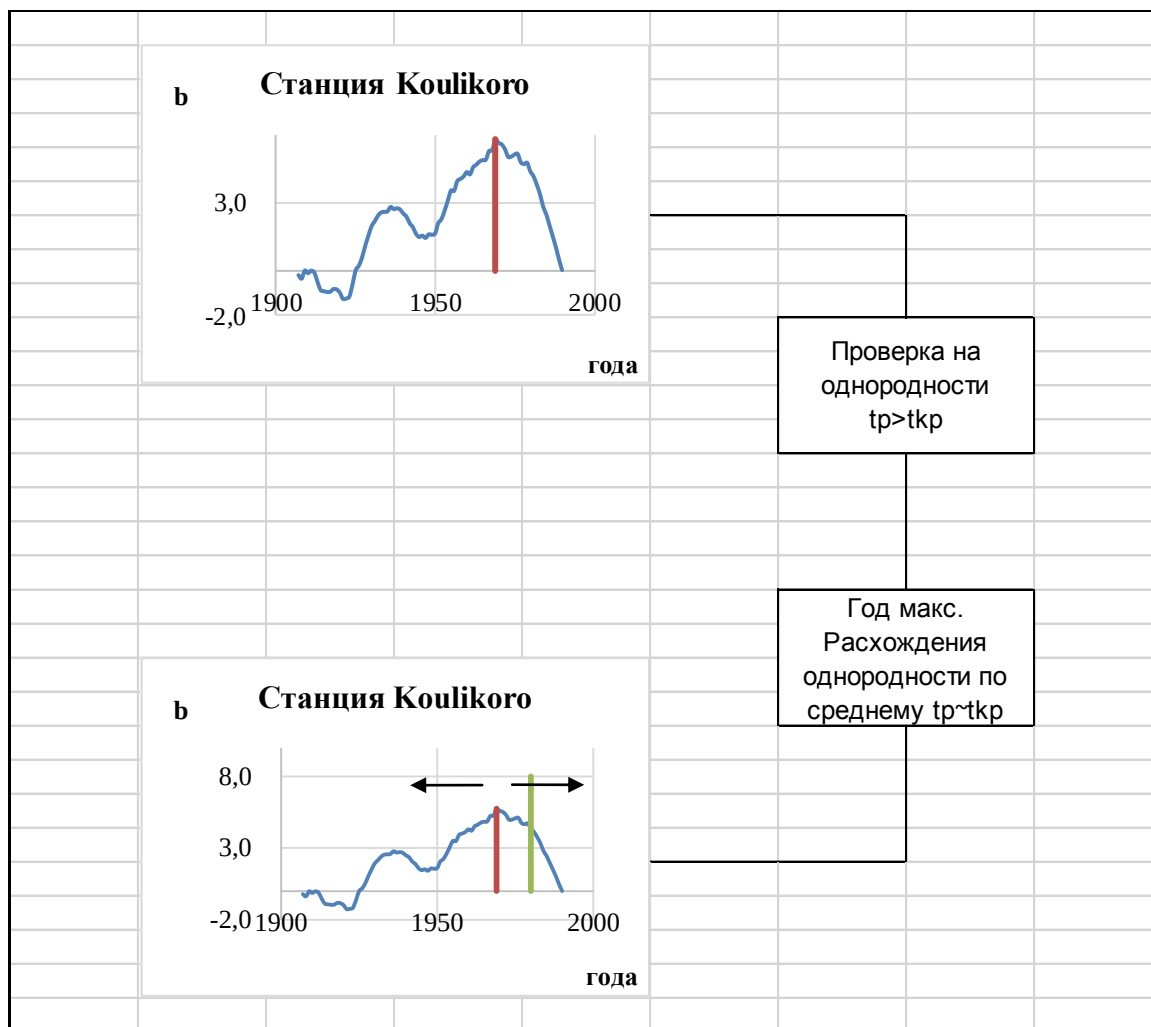


Рисунок 4 – Пояснение алгоритма выбора года максимального расхождения однородности по среднему ($b = \sum(k_i - 1)/Cv$).

По представленному на рисунке 4 алгоритму были определены года максимального расхождения однородности по среднему для 5 % у. з. (таблица 11). Года немного варьируются.

Таблица 11 – Год максимального расхождения однородности по среднему для 5 % у.з.

№	Код поста	Год
1	1134100	1969
2	1134700	1970
3	1812500	1967

№	Код поста	Год
4	1732100	1970
5	1159100	1963
6	1159800	1970
7	1159900	1974
8	1160300	1974
9	1160320	1974
10	1160510	1975
11	1160650	1976
12	1160680	1973
13	1160800	1968
14	1196350	1974
15	1197300	1976
16	1537100	1971
17	1357100	1976

Статистическая обработка рядов наблюдений (два периода) для ретроспективного прогноза

Для каждого периода были определены также статистические характеристики, результаты представлены в таблицах 12, 13.

Таблица 12 – Статистические характеристики первого периода ряда наблюдения за речным стоком

Первый период						
№	Код поста	Водность относительно второго периода	h , мм	C_v	C_s	C_s/C_v
1	1134100	многоводный	450	0.15	0.05	0.31
2	1134700	многоводный	113	0.14	0.41	2.97
3	1812500	многоводный	128	0.18	-0.35	-1.96
4	1732100	многоводный	228	0.97	2.51	2.60
5	1159100	многоводный	10	0.59	1.46	2.46
6	1159800	многоводный	42	0.71	1.98	2.80
7	1159900	маловодный	36	0.56	0.89	1.61
8	1160300	многоводный	176	0.58	0.95	1.65
9	1160320	многоводный	39	0.67	1.72	1.07

Первый период						
№	Код поста	Водность относительно второго периода	h , мм	C_v	C_s	C_s/C_v
10	1160510	многоводный	12	2.13	3.64	1.71
Первый период						
№	Код поста	Водность относительно второго периода	h , мм	C_v	C_s	C_s/C_v
11	1160650	многоводный	354	0.29	0.74	2.55
12	1160680	маловодный	291	0.35	0.27	0.78
13	1160800	многоводный	174	0.43	-0.34	-0.79
14	1196350	маловодный	20	0.96	1.44	1.51
15	1197300	многоводный	92	0.30	0.48	1.57
16	1537100	многоводный	69	0.32	1.67	5.16
17	1357100	многоводный	26	0.23	0.55	2.46

Таблица 13 – Статистические характеристики второго периода ряда наблюдения за речным стоком

Второй период						
№	Код поста	Водность относительно второго периода	h , мм	C_v	C_s	C_s/C_v
1	1134100	маловодный	268	0.29	0.36	1.25
2	1134700	маловодный	66	0.24	0.16	0.69
3	1812500	маловодный	61	0.47	0.06	0.13
4	1732100	маловодный	112	0.53	0.58	1.09
5	1159100	маловодный	6	0.89	1.88	2.11
6	1159800	маловодный	30	1.10	2.14	1.95
7	1159900	многоводный	78	0.94	1.22	1.30
8	1160300	маловодный	140	0.49	1.32	2.69
9	1160320	маловодный	36	0.71	1.32	1.86
10	1160510	маловодный	7	1.02	3.70	3.64
11	1160650	маловодный	307	0.36	0.57	1.59
12	1160680	многоводный	328	0.53	0.69	1.30
13	1160800	маловодный	110	0.69	0.41	0.59
14	1196350	многоводный	33	1.20	1.33	1.11
15	1197300	маловодный	58	0.79	1.82	2.31
16	1537100	маловодный	34	0.36	0.25	0.69
17	1357100	маловодный	21	0.24	0.65	2.71

Так как периоды имеют меньшее число наблюдений, то были оценены погрешности статистических характеристик для каждого периода. Результаты показаны в таблице 14.

Таблица 14 – Погрешности статистических характеристик для первого и второго периодов

№	Код поста	Первый период			n_1	Второй период			n_2
		$\delta(q)$	$\delta(Cv)$	$\delta(Cs)$		$\delta(q)$	$\delta(Cv)$	$\delta(Cs)$	
1	1134100	3,53	16,3	–	19	6,33	15,8	184	21
2	1134700	3,13	15,9	143	20	5,37	16,1	400	20
3	1812500	4,37	17,3	186	17	11,1	17,6	–	18
4	1732100	21,7	18,5	72,7	20	12,2	17,3	170	19
5	1159100	16,4	20,6	89,5	13	14,4	14,2	63,0	38
6	1159800	15,9	17,6	63,7	20	22,9	18,1	94,2	23
7	1159900	11,4	15,7	103	24	18,1	16,5	123	27
8	1160300	11,8	15,8	99,5	24	9,43	14,6	59,0	27
9	1160320	13,7	16,2	63,1	24	13,9	15,8	83,7	26
10	1160510	42,6	19,3	154	25	20,4	17,3	47,1	25
11	1160650	5,69	14,3	80,1	26	7,35	15,0	120	24
12	1160680	7,30	15,3	255	23	10,2	14,8	120	27
13	1160800	10,1	17,4	254	18	13,8	16,0	267	25
14	1196350	19,6	17,3	114	24	23,1	17,5	159	27
15	1197300	5,88	14,3	127	26	15,8	16,4	69,6	25
16	1537100	6,98	15,9	41,3	21	8,26	16,8	307	19
17	1357100	4,51	14,1	100	26	4,90	14,7	89,8	24

Из таблицы 14 видно, что в целом погрешности по всему ряду незначительно отличаются от погрешностей для двух периодов для среднего значения и коэффициента вариации. Для коэффициента асимметрии погрешности по всему ряду меньше.

2.2 Метеорологическая информация

В настоящее время высказываются предположения о том, что в сравнительно близком будущем могут произойти существенные климатические

изменения. Одним из наиболее важных последствий изменения климата является изменение гидрологического режима рек и озер. Очевидно, что для планирования и управления хозяйственной деятельностью на реках, озерах, водохранилищах, и т. п. необходимо максимально широко и все-сторонне использовать знания о климате и о последствиях его изменения, а именно о норме осадков, которая используется в прогностическом уравнении в качестве входа, внешнего воздействия.

Гидрологические и метеорологические характеристики относятся к центрам водосбора, поэтому пришлось их определять. Результаты представлены в таблице 15. На рисунке 5 показано расположение центров водосбора.

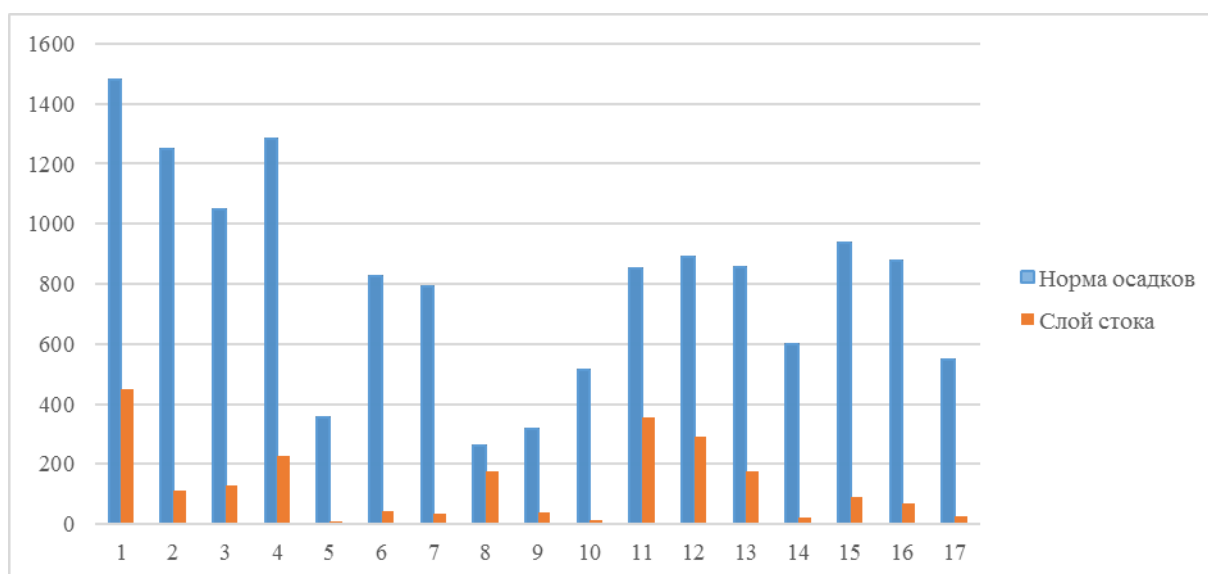
Таблица 15 – Координаты центров водосборов выбранных рек Африки

№	Код поста	Координаты поста, град.		Координаты центра водосбора, град.	
		широта	долгота	широта	долгота
1	1134100	12,87	–7,55	11,01	–9,02
2	1134700	16,27	–3,38	11,6	–7,02
3	1812500	14,90	–12,45	13,6	–10,65
4	1732100	6,92	1,67	8,3	1,23
5	1159100	–28,76	17,72	–28,0	23,00
6	1159800	–26,82	28,06	–29,5	28,75
7	1159900	–27,17	29,23	–28,0	30,00
8	1160300	–33,38	19,30	–33,9	19,50
9	1160320	–32,50	19,54	–33,3	21,55
10	1160510	–33,10	26,44	–32,3	25,70
11	1160650	–30,73	29,83	–30,7	29,65
12	1160680	–29,78	29,47	–29,8	29,25
13	1160800	–27,44	29,98	–27,4	30,17
14	1196350	–25,78	27,76	–25,9	27,65
15	1197300	–26,04	31,00	–26,1	29,97
16	1537100	12,12	15,03	11,5	18,63
17	1357100	–18,28	21,80	–18,5	17,13

№	Код поста	Норма осадков для первого периода, мм	Норма осадков для второго периода, мм
7	1159900	793	791
8	1160300	261	310
9	1160320	318	330
10	1160510	514	521
11	1160650	851	804
12	1160680	889	912
13	1160800	856	855
14	1196350	601	577
15	1197300	937	849
16	1537100	877	717
17	1357100	549	458

Соотношение норм стока и осадков для периодов показано на гистограмме (рисунок 6). Видно, при больших осадках больший слой стока, в большинстве случаев.

а)



б)

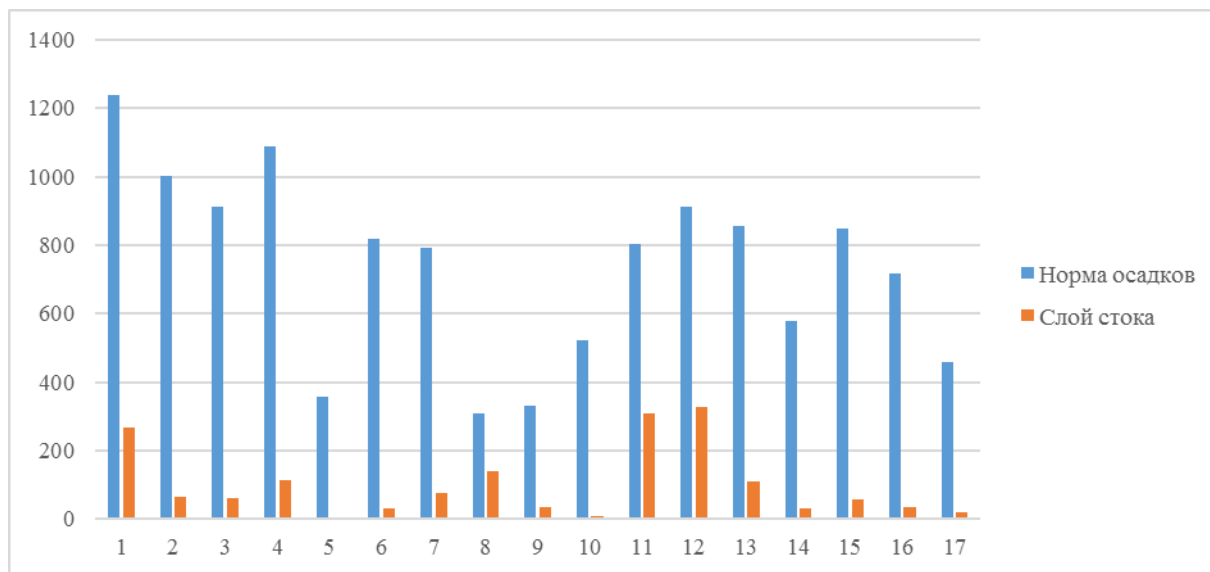


Рисунок 6 – Соотношение норм стока и осадков (*а* – для первого периода, *б* – для второго периода).

3 РЕТРОСПЕКТИВНЫЕ ПРОГНОЗЫ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОДОВОГО СТОКА АФРИКИ

3.1 Прямой прогноз

Прямой прогноз, в нашем понимании, – прогноз с первой половины на вторую. В таблице 17 представлено изменения математического ожидания и коэффициента вариации рек Африки и их отклонения от фактических значений. В результате исследований, видно, что прогноз оправдался, так как величины отклонений меньше, в большинстве случаев меньше погрешности определения рассматриваемых величин. Реки Африки с такой эволюцией могут пересыхать, так как среднее значение существенно уменьшилось. В десяти случаях из 17 прогноз среднего оправдался (отклонения не превышают 10 %), в 11 случаях прогноз коэффициент вариации оправдался (отклонения не превышают 15 %).

Таблица 17 – Прогнозные характеристики и их отклонение от фактических

№	Код поста	$m_{1ф}$, мм	$m_{1пр}$, мм	$m_{2ф}$, мм	$m_{2пр}$, мм	Δm_1 , %	ΔCv , %
1	1134100	450	377	3007949	2132370	16	–19
2	1134700	113	90	1506568	980980	20	–25
3	1812500	128	111	805558	616784	13	–15
4	1732100	228	194	47147	40349	15	–18
5	1159100	10	10	105456	105363	0,06	–0,1
6	1159800	42	42	3953	3907	0,9	–0,9
7	1159900	36	36	30,0	29,8	0,36	–0,4
8	1160300	176	210	18,0	23,6	–19	16
9	1160320	39	40	105	111	–4	4
10	1160510	7	8	165	166	–1	1
11	1160650	354	334	72,5	65,3	6	–6
12	1160680	291	298	28,3	29,6	–3	3
13	1160800	174	173	16,8	16,8	0	0
14	1196350	20	19	1,03	0,99	4	–4

№	Код поста	$m_{1ф}$, мм	$m_{1пр}$, мм	$m_{2ф}$, мм	$m_{2пр}$, мм	Δm_1 , %	ΔC_v , %
15	1197300	92	83	284	237	9	–10
16	1537100	69	57	1933963	1351470	18	–22
17	1357100	26	22	124236	88278	17	–20

Для Мали (код поста 1134100) были построены кривые обеспеченности, прогнозные и фактические (таблица 18, рисунок 6).

Таблица 18 – Координаты кривой обеспеченности Пирсона III типа для реки Мали

P , %	Прямой прогноз			
	tp		Q	
	факт.	прогноз.	факт.	прогноз.
0.01	3.83	3.85	2723	1439
0.10	3.16	3.17	2547	1463
1	2.36	2.37	2337	1700
5	1.65	1.66	2150	2754
10	1.28	1.29	2053	4072
20	0.84	0.84	1935	6708
30	0.52	0.51	1850	9345
50	–0.01	–0.01	1712	14617
70	–0.53	–0.53	1575	19889
80	–0.84	–0.84	1492	22525
90	–1.28	–1.27	1378	25161
95	–1.63	–1.62	1286	26479
97	–1.86	–1.85	1224	27007
99	–2.45	–2.47	1070	27534
99.9	–3.02	–3.01	917	27771

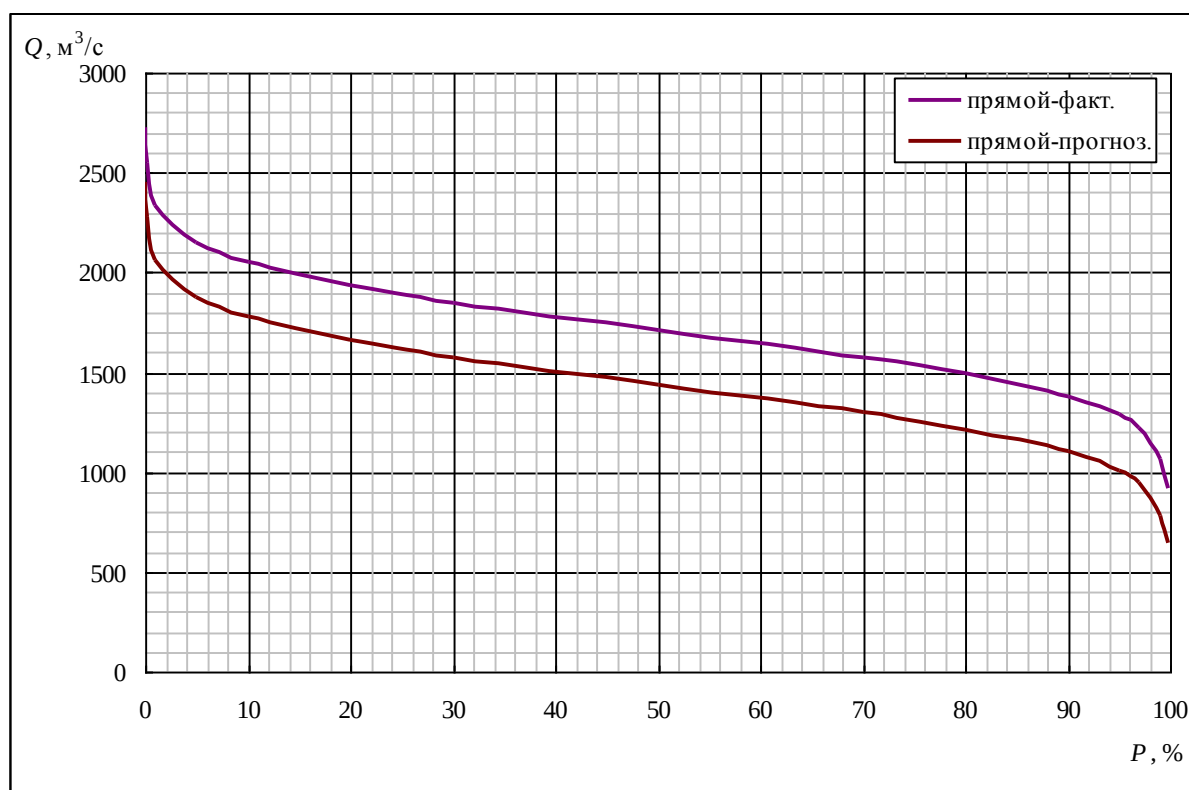


Рисунок 7 – Прогнозная и фактическая кривые обеспеченности для реки Мали.

Из рисунка 7, мы видим, что кривая прогнозов находится под фактической, это говорит о том, что существует возможность пересыхания реки Африки в этих районах, что скорее всего связано с уменьшением выпадения осадков в них.

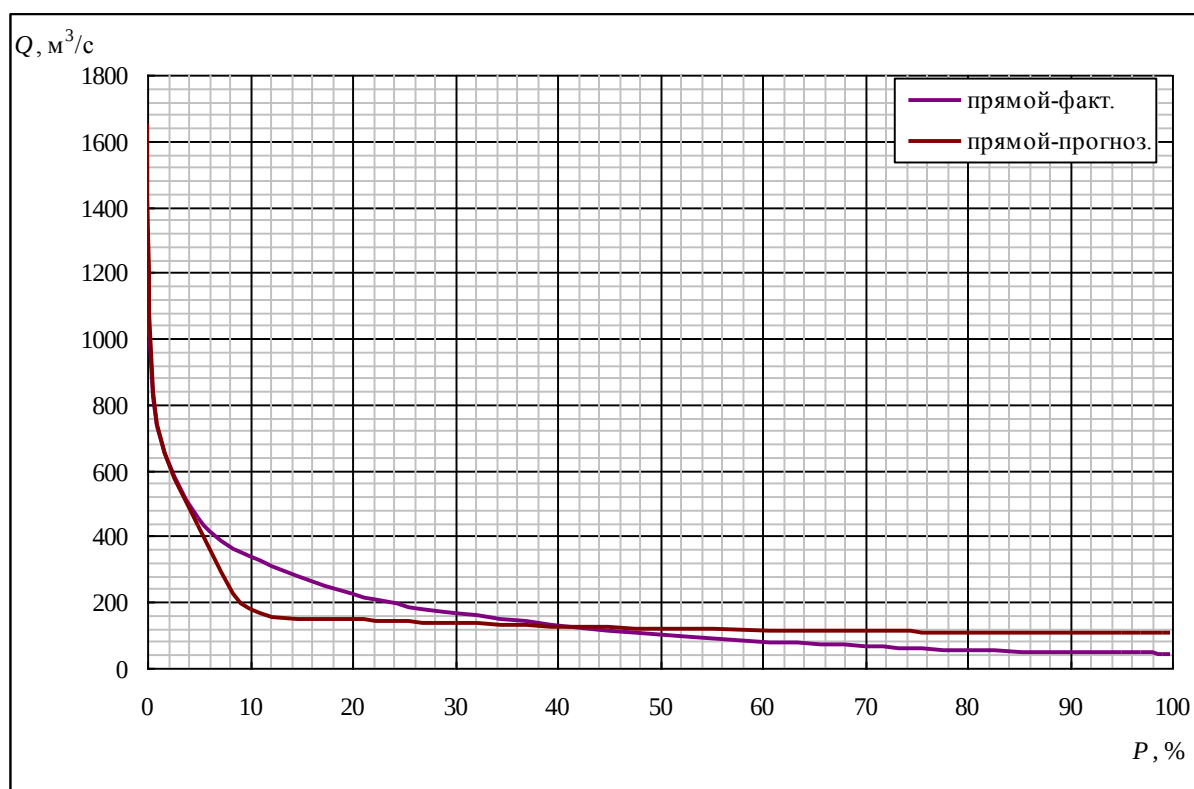
Для подтверждения нашей гипотезы, мы еще выбрали одну реку Бенина, (код поста 1732100). Анализ результата не противоречил. Следует принимать меры, для предотвращения пересыхания рек Африканского континента.

Таблица 19 – Координаты кривой обеспеченности Пирсона III типа для реки Бенина

P, %	Прямой прогноз			
	tp		Q	
	факт.	прогноз.	факт.	прогноз.
0.01	9.21	10.06	1546	1651

$P, \%$	Прямой прогноз			
	tp		Q	
	факт.	прогноз.	факт.	прогноз.
0.10	6.46	7.04	1131	1195
1	3.82	4.03	733	740
5	2.00	1.98	458	431
10	1.19	0.28	336	175
20	0.46	0.10	225	147
30	0.07	0.01	167	134
50	-0.38	-0.10	99	118
70	-0.60	-0.15	65	110
80	-0.68	-0.16	53	108
90	-0.72	-0.16	47	108
95	-0.73	-0.16	46	108
97	-0.74	-0.17	45	107
99	-0.74	-0.17	44	107
99.9	-0.74	-0.17	44	107

a)



б)

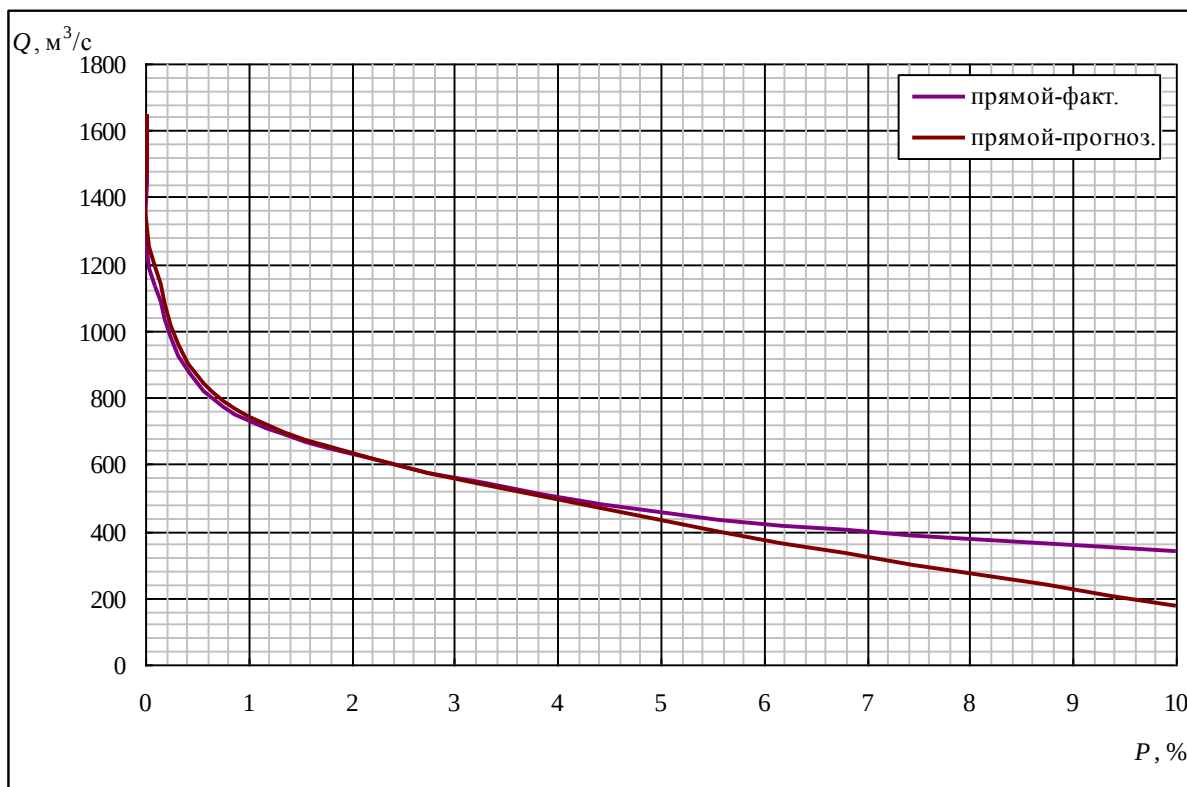


Рисунок 8 – Прогнозная и фактическая кривые обеспеченности для реки Бенина (б – увеличенный фрагмент кривой).

3.2 Обратный прогноз

Под обратным прогнозом понимается прогноз со второго периода на первый.

Имея результаты прямого прогноза, мы можем сделать и обратный, чтобы убедиться в нашем предположении.

Результаты этого эксперимента представлены в таблице 20. Здесь мы видим, что абсолютные ошибки коэффициентов вариации ΔC_v и математического ожидания Δm_1 различаются только в знаках (+) и (–). Это говорит нам о том, что соблюдается физика процесса: с увеличением стока уменьшается коэффициент вариации. Далее мы наблюдаем наоборот, т. е.

сток рек Африки уменьшился бы, если бы с будущего мы переходили к прошлому. В 10 случаях из 17 прогноз среднего оправдался (отклонения не превышают 10 %), в 12 случаях прогноз коэффициент вариации оправдался (отклонения не превышают 15 %).

Таблица 20 – Прогнозные характеристики и их отклонение от фактических

№	Код поста	$m_{1ф}$, мм	$m_{1пр}$, мм	$m_{2ф}$, мм	$m_{2пр}$, мм	Δm_1 , %	ΔC_v , %
1	1134100	268	320	1132191	1575541	–19	16
2	1134700	66	82	538077	818895	–25	20
3	1812500	61	70	218628	275650	–15	13
4	1732100	112	132	7522	9787	–18	15
5	1159100	6	6	47042	47073	–0,1	0,1
6	1159800	30	30	2883	2906	–0,9	0,9
7	1159900	78	79	202	203	–0,4	0,4
8	1160300	140	117	10,5	8,0	16	–19
9	1160320	36	35	94,1	89,5	4	–4
10	1160510	12	12	151	149	1	–1
11	1160650	307	325	56,9	63,0	–6	6
12	1160680	328	320	41,3	39,7	3	–3
13	1160800	110	111	8,50	8,51	0	0
14	1196350	33	34	3,67	3,80	–4	4
15	1197300	58	65	171	195	–10	9
16	1537100	34	42	470658	678619	–22	18
17	1357100	21	25	76038	107481	–20	17

Для Мали (код поста 1134100) были построены кривые обеспеченности, прогнозные и фактические (таблица 21, рисунок 9).

Таблица 21 – Координаты кривой обеспеченности Пирсона III типа для реки Мали

P , %	Обратный прогноз			
	tp		Q	
	факт.	прогноз.	факт.	прогноз.
0.01	4.52	4.39	2360	2518
0.10	3.60	3.52	2089	2262

$P, \%$	Обратный прогноз			
	tp		Q	
	факт.	прогноз.	факт.	прогноз.
1	2.58	2.54	1786	1972
5	1.74	1.73	1537	1730
10	1.32	1.31	1412	1608
20	0.82	0.83	1265	1464
30	0.48	0.49	1163	1363
50	-0.06	-0.05	1004	1205
70	-0.57	-0.56	854	1054
80	-0.85	-0.85	770	968
90	-1.24	-1.25	656	851
95	-1.53	-1.55	568	761
97	-1.72	-1.75	513	703
99	-2.19	-2.42	375	503
99.9	-2.59	-2.68	254	428

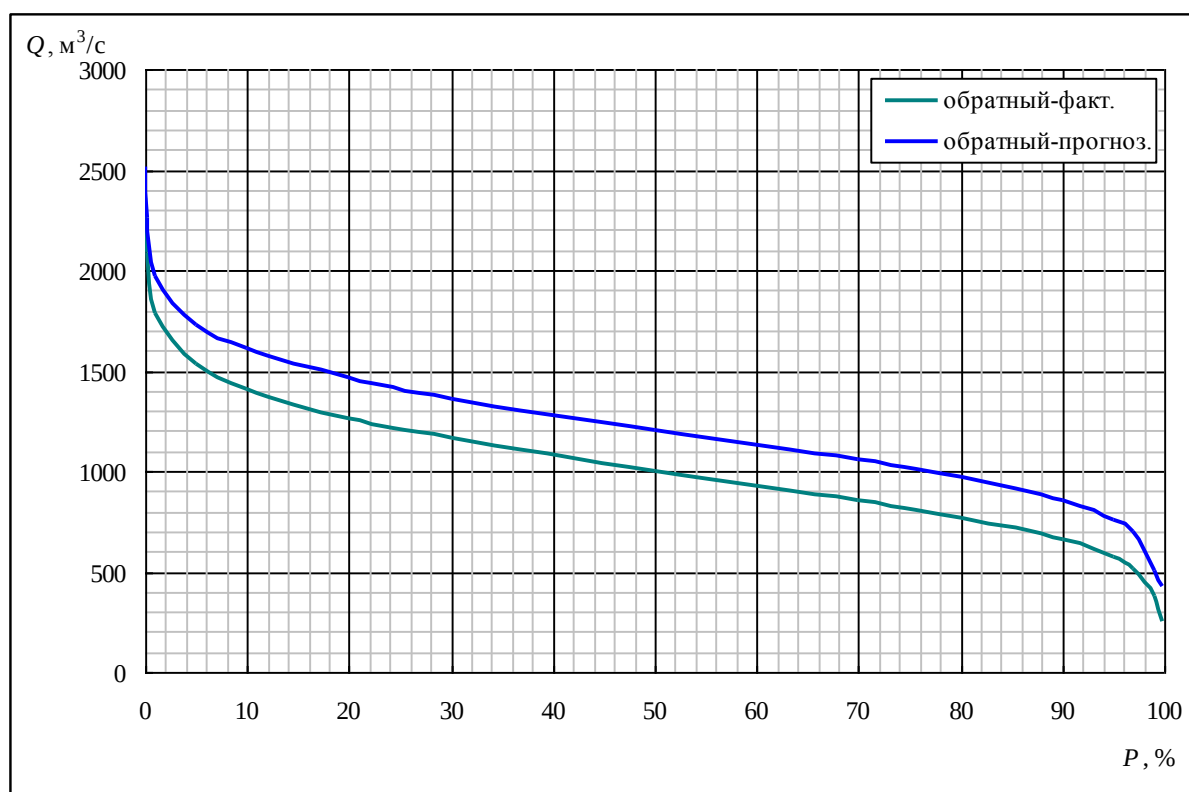


Рисунок 9 – Прогнозная и фактическая кривые обеспеченности для реки Мали.

Для Бенина (код поста 1732100) были построены кривые обеспеченности, прогнозные и фактические (таблица 22, рисунок 10).

Таблица 22 – Координаты кривой обеспеченности Пирсона III типа для реки Бенина

<i>P</i> , %	Обратный			
	<i>tp</i>		<i>Q</i>	
	факт.	прогноз.	факт.	прогноз.
0.01	5.01	4.81	281	286
0.10	3.93	3.80	237	245
1	2.74	2.67	188	199
5	1.80	1.77	150	162
10	1.33	1.32	131	144
20	0.80	0.81	109	123
30	0.44	0.46	95	109
50	−0.10	−0.08	73	87
70	−0.59	−0.58	53	67
80	−0.85	−0.85	42	56
90	−1.20	−1.22	28	41
95	−1.46	−1.49	17	30
97	−1.62	−1.66	11	23
99	−1.90	−1.96	−1	10
99.9	−2.30	−2.42	−17	−8

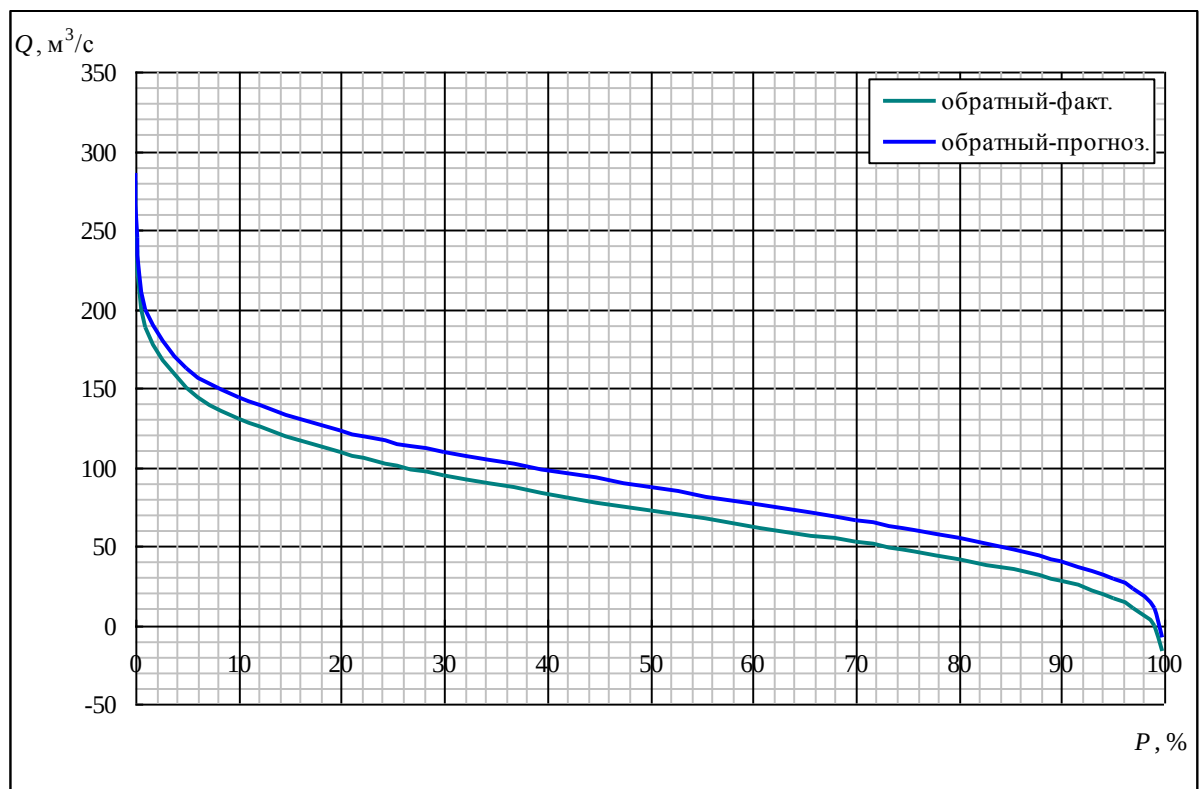


Рисунок 10 – Кривые обеспеченности при обратном прогнозе.

4 НЕУСТОЙЧИВОСТЬ И ФРАКТАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА РЯДОВ ГОДОВОГО СТОКА РЕК АФРИКИ

На кафедре гидрофизики и гидропрогнозов установлено, что ряды многолетнего стока имеют фрактальную размерность, т. е. порождающие их объекты (речные бассейны) развиваются. Также установлено, что почти на всей территории Африки формирование стока неустойчиво по третьему, а часто и второму начальным моментам, т. е. по коэффициентам асимметрии и вариации. Игнорирование этих обстоятельств обуславливает повышенную вероятность гидрологических катастроф по сравнению с оценками, основанными на предположении устойчивости многолетнего речного стока.

В зонах неустойчивости можно говорить о наличии «толстых хвостов» у распределений плотности вероятности (хвост распределений спадает не по экспоненте как в устойчивом случае, а по степенному закону), это и делает невозможным получение надежных обеспеченных значений расходов воды.

Устойчивость можно добиться, увеличивая число фазовых переменных, которые используются в моделях описывающих формирование многолетнего речного стока. Увеличение числа фазовых переменных влечет за собой замену одномерного распределения плотности вероятности многомерной функцией распределения плотности вероятности. Кроме расхода воды должно быть учтено еще испарение, как наиболее важная водобалансовая составляющая после стока. Встает вопрос о получении обеспеченных значений расходов воды по двумерному распределению.

4.1 Неустойчивость процесса формирования годового стока

Все виды многолетнего стока описываются распределениями Пирсона III типа (кривыми Крицкого–Менкеля). Эти распределения принадлежат классу распределений К. Пирсона. Это означает, что математической моделью формирования многолетних видов стока является линейный формирующий фильтр, решения которого статистически эквивалентны решению уравнения ФПК (см. раздел 1.1.). Уравнение ФПК аппроксимируется системой уравнений для моментов (система (5)).

До появления в гидрологии системы уравнений (5) вопрос о неустойчивости моментов не поднимался. Подобная терминология встречалась в связи с неустойчивостью эмпирических оценок стока из-за ограниченной продолжительности рядов наблюдений за ним. Проблема неустойчивости появилась при использовании упрощенного варианта системы (5) для оценки гидрологических последствий изменения климата (см. [15, 16]). Небольшие погрешности расчетов приводили к большому разбросу численных значений третьего, а иногда и второго моментов. Позже в [17, 18] был предпринят линейный анализ устойчивости системы (5), который сводился к следующему.

На устойчивость исследовалось стационарное решение указанной системы, т. е. семейство кривых К. Пирсона. Было введено обозначение $\dot{m}_i = dm_i/dt$, и матрица оператора системы (5) записана в следующем виде [17]:

$$M = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{m}_1}{\partial m_1} & 0 & 0 & 0 \\ 2\bar{N} - 3G_{\tilde{c}\tilde{N}} & \frac{\partial \dot{m}_2}{\partial m_2} & 0 & 0 \\ 3G_{\tilde{N}} & 3\bar{N} - 7,5G_{\tilde{c}\tilde{N}} & \frac{\partial \dot{m}_3}{\partial m_3} & 0 \\ 0 & 6G_{\tilde{N}} & 4\bar{N} - 14G_{\tilde{c}\tilde{N}} & \frac{\partial \dot{m}_4}{\partial m_4} \end{bmatrix}.$$

Уравнение для определения ее собственных значений λ имело вид:

$$\det(M - \lambda E) =$$

$$= \det \begin{bmatrix} (-\bar{c} + 0.5G_{\tilde{c}}) - \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 2\bar{N} - 3G_{\tilde{c}\tilde{N}} & (-2\bar{c} + 2G_{\tilde{c}}) - \lambda & 0 & 0 \\ 3G_{\tilde{N}} & 3\bar{N} - 7.5G_{\tilde{c}\tilde{N}} & (-3\bar{c} + 4.5G_{\tilde{c}}) - \lambda & 0 \\ 0 & 6G_{\tilde{N}} & 4\bar{N} - 14G_{\tilde{c}\tilde{N}} & (-4\bar{c} + 8G_{\tilde{c}}) - \lambda \end{bmatrix} = 0$$

или

$$[(-\bar{c} + 0.5G_{\tilde{c}}) - \lambda][(-2\bar{c} + 2G_{\tilde{c}}) - \lambda][(-3\bar{c} + 4.5G_{\tilde{c}}) - \lambda][(-4\bar{c} + 8G_{\tilde{c}}) - \lambda] = 0.$$

Спектр собственных значений:

$$\lambda_1 = -\bar{c} + 0.5G_{\tilde{c}}; \lambda_2 = -2\bar{c} + 2G_{\tilde{c}}; \lambda_3 = -3\bar{c} + 4.5G_{\tilde{c}}; \lambda_4 = -4\bar{c} + 8G_{\tilde{c}}.$$

Условие диссипативности системы, обеспечивающее линейную устойчивость сводилось в следующем: $\text{div } m_i = \sum_{i=1}^4 d\dot{m}_i / dm_i < 0$; $\bar{c} > 2G_{\tilde{c}}$. При $G_{\tilde{c}} > 0,67\bar{c}$ процесс теряет устойчивость по третьему моменту, при $G_{\tilde{c}} > \bar{c}$ – по второму, при $G_{\tilde{c}} > 2\bar{c}$ – по первому. Таким образом, критерием устойчивости служит относительная интенсивность шума $\beta = G_{\tilde{c}} / \bar{c}$ (неустойчивость возникает при $\beta > 2/i$, где i – порядок момента). В таком виде

формулу для определения устойчивости использовать практически невозможно. Поэтому было взято на вооружение то известное обстоятельство, что для марковских случайных процессов автокорреляционная функция (являющаяся частным решением уравнения ФПК) является экспонентой $r = \exp[-(\bar{c} - 0,5G_{\bar{c}})\Delta t]$. При годовой сдвиге $\Delta t = 1$ из данного выражения следует формула [17]

$$\beta = 2k \ln r(1) + 2, \quad (11)$$

где k – коэффициент стока;

$r(1)$ – коэффициент автокорреляции между смежными годами.

В формулу (11) входят величины, которые легко определяются рядам наблюдений. Для коэффициента стока есть мировые карты, а значения $r(1)$ районированы для России. Расчеты распределения β по территории России показали наличие значительных территорий, неустойчивые по третьему и (в меньшей степени) по второму моментам [17]. По норме процесс всегда устойчив, так как $r < 1$; $k < 1$.

Критерий устойчивости был рассчитан и для Африки [19]. На рисунке 11 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.

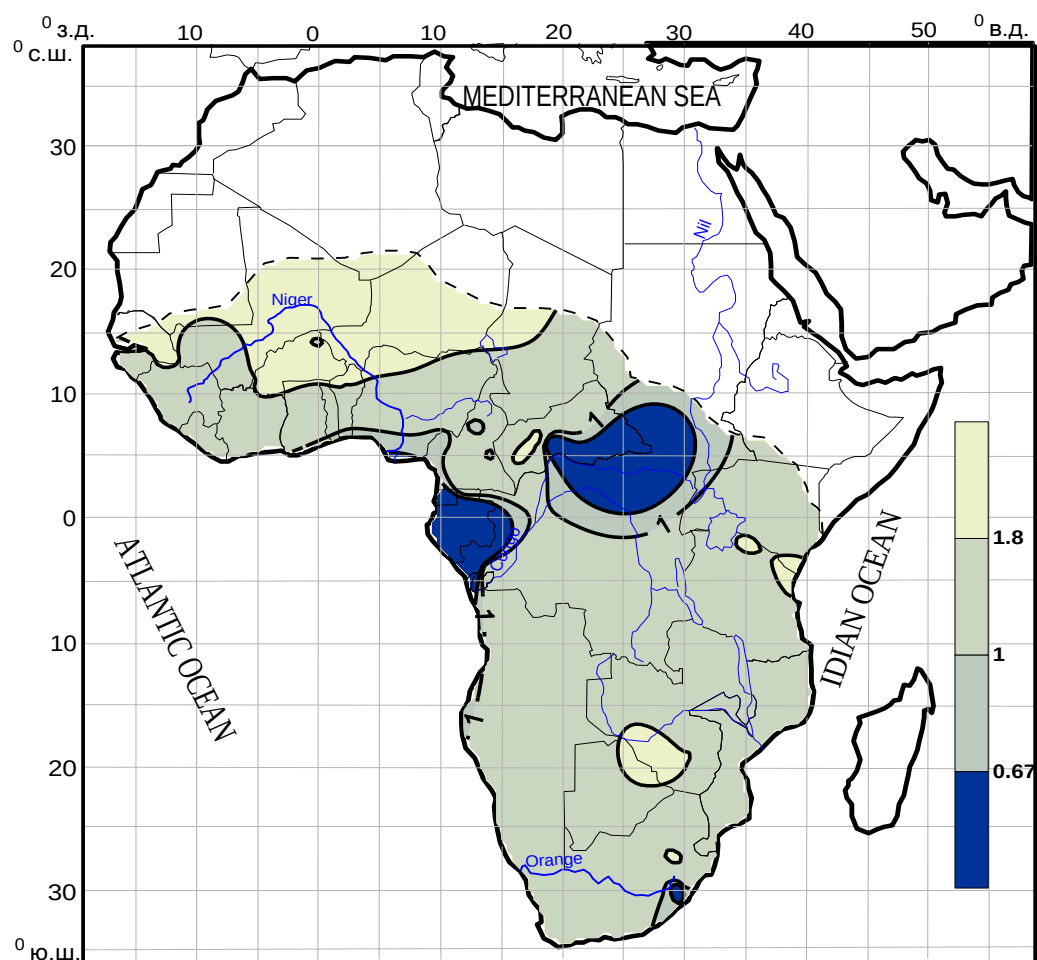


Рисунок 11 – Неустойчивость многолетнего годового стока на территории Африки по критерию β : 1) $\beta < 2/3$, 2) $\beta > 1$, 3) $\beta \geq 1,8$ (но меньше двух) [19].

4.2 Фрактальная размерность рядов годового стока

Фрактальная размерность описывает степень заполненности изучаемым объектом своего пространства вложения. Этим объектом в данном случае служит временной ряд расходов воды. Далее идет цитата из источника [17]. «Фрактальность ряда связывается с порождающими его факторами. Если этих факторов много и они равновероятны, то приходим к бе-

лому шуму, который заполняет пространство вложения наподобие ничем не связанных молекул газа, заполняющего объем. Если же во временном ряде существуют корреляции, то они образуют группировки членов ряда. Это приводит к тому, что у ряда появляется своя собственная размерность (фрактальная, дробная).

Знание фрактальных размерностей предельных множеств (аттракторов) позволяет оценить минимальное число фазовых переменных, необходимых для описания изучаемых процессов (размерность пространства вложения). Одновременное измерение всех составляющих вектора системы $\vec{x}(t)$ не всегда возможно (мы можем не знать ни размерности $\vec{x}(t)$, ни что из себя представляют его составляющие; возможно для наблюдения доступен только один из компонентов вектора $\vec{x}(t)$). Однако Такенс [20] обосновал возможность восстановления размерности аттракторов d в фазовом пространстве размерности n по временной последовательности одного компонента, который несет информацию обо всех переменных, формирующих аттрактор. Почти всегда $d < n$; математически этот факт говорит о некомпактности («рыхлости») фрактала.

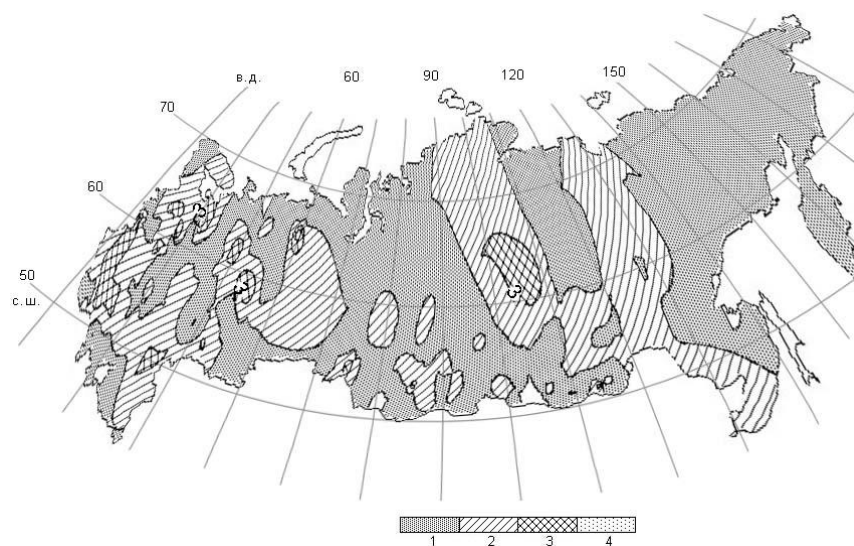
Следовательно, восстановив по временному ряду фрактальную размерность, можно целое число, непосредственно следующее за нею, считать минимальным числом переменных, необходимых для построения модели. Оно определяет наименьшее число дифференциальных уравнений первого порядка, описывающих динамику изучаемой системы.»

Фрактальная диагностика была проведена для годового стока России по большому числу гидропостов. Было получено, что четкой зональности в распределении размерности пространств вложения годового стока не наблюдается (рисунок 1, а [21]). Отмечается также, что преобладает территория с размерностью равной единице, т. е. для описания процессов формирования годового стока в таких областях необходимо одно дифференциальное уравнение первого порядка. Регионы, в которых необходима систе-

ма из двух дифференциальных уравнений для устойчивого вероятностного описания годового стока, находятся в основном на юге России.

Была проведена фрактальная диагностика годового стока Западной Африки [21]. На рисунке 12, б видно, что в этом регионе отсутствуют области с размерностью пространства вложения больше двух.

а)



б)

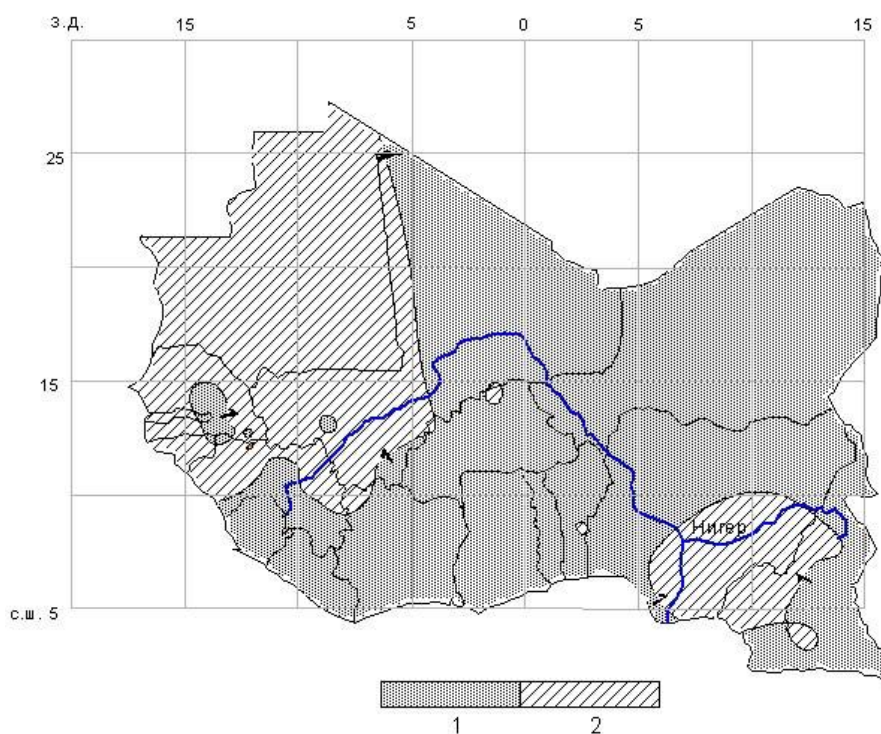


Рисунок 12 – Распределение фрактальной размерности по территории России (а) и Западной Африки (б).

5 ГЕНЕРИРОВАНИЕ РЯДОВ ИСПАРЕНИЯ

Методы генерирования рядов испарения

Существует несколько наиболее распространенных методов расчета испарения:

- расчет испарения по уравнению водного баланса;
- расчет испарения по уравнению связи М. И. Будыко;
- метод П. С. Кузина;
- расчет испарения по температуре воздуха и упругости водяного пара;
- расчет испарения по уравнению Тюрка;
- расчет испарения по методу Пенмана–Монтейна;

Сравнение этих методов и возможность применения их для территории Африки сделано в работе [22]. Здесь будут изложены только основные выводы этой работы.

Метод водного баланса основан на одноименном уравнении

Уравнение водного баланса за годовой период времени записывается

$$P = h + E \pm \Delta u, \quad (12)$$

где P – атмосферные осадки, выпавшие на водосбор, мм;

h – слой речного стока в замыкающем створе, мм;

Δu – изменение влагозапасов в бассейне, мм.

Данный метод имеет ограничение в применимости для водосборов Африки. Это ограничение связано с недостатком материалов независимых наблюдений за всеми составляющими водного баланса.

Одним из наиболее физически обоснованных методов расчета величины испарения является *метод М. И. Будыко*, который основан на уравнении теплового баланса подстилающей поверхности.

Метод Будыко применяется для определения нормы испарения, получить по нему ряды испарения невозможно.

Метод расчета испарения с поверхности бассейна, разработанный *П. С. Кузиным*, основан на предположении о пропорциональности величины испарения с поверхности бассейна в зоне достаточного увлажнения дефициту влажности воздуха [22].

Данного метод разработан для зон достаточного увлажнения. Это означает невозможность применения метода Кузина для Африканских водосборов.

Метод, разработанный *А. Р. Константиновым*, в основе которого лежит номограмма, содержащая температуру воздуха и упругость водяного пара, имеет ограничения в использовании. Ограничения связаны с температурным и влажностным диапазоном.

Расчетная формула годового испарения по *методу Тюрка* разработана на основе результатов исследований процесса испарения, имеет следующий вид:

$$E = P / \sqrt{0,9 + \frac{P^2}{(300 + 25T + 0.05T^3)^2}}, \quad (13)$$

где E – суммарное годовое испарение, мм/год;

P – годовое количество осадков, мм/год;

T – среднегодовая температура воздуха, °С.

Метод Тюрка применим для любых сочетаний значений температуры и осадков. «Но с другой стороны, данный метод, по сути своей, не осо-

бо отличается от метода водного баланса потому, что по нему можно определить не реальное испарение с поверхности водосбора, а совокупность потерь, включающую, например, инфильтрацию. Следовательно, можно сказать, что полученные этим методом потери (дефицит стока) будут почти сопоставимы с реальными значениями испарения для тех территорий, где испарение является преобладающим из всех потерь, так как остальные потери настолько малы по сравнению с испарением, что ими можно пренебречь.» [22].

Метод Пенмана–Монтейна рекомендован Продовольственной и Сельскохозяйственной Организацией ООН (ФАО) совместно с Международным Комитетом по Ирригации и Дренажу (МКИД) и Всемирной метеорологической организацией (ВМО), но данный метод, несмотря на рекомендации ФАО, очень трудоемкий. В нем требуется большое число суточных метеорологических характеристик (солнечная радиация, температура и влажность воздуха, скорость ветра), измеренных на высоте 2 м (или преобразованных для этой высоты).

Из вышеизложенного понятно, что наиболее подходящим методом для генерирования рядов испарения в условиях Африки является метод Тюрка.

Генерирование рядов испарения по методу Тюрка

База данных описана в разделе 2. Следует отметить только, что к ней была добавлена информация по среднегодовой температуре приземного воздуха. Значения температуры относились к центру водосбора.

В таблице 23, для примера, показаны ряды гидрометеорологических элементов для станции Koulikoro (Мали). Из этой таблицы видно, что при одной и тоже температуре значения испарения изменяются пропорционально с изменением осадков.

Таблица 23 – Ряды гидрометеорологических элементов для станции Koulikoro

Год	Q , м ³ /с	h , мм	X , мм	T , °C	E , мм
1951	2052	539	1684	26,4	1290
1952	1655	434	1403	26,4	1161
1953	1932	507	1674	26,3	1282
1954	2024	531	1758	26,3	1315
1955	2036	534	1511	26,3	1211
1956	1391	365	1350	26,7	1143
1957	2014	529	1812	26,6	1350
1958	1540	404	1572	26,2	1236
1959	1559	409	1445	26,4	1183
1960	1674	440	1503	27,1	1234
1961	1269	333	1451	26,6	1193
1962	1849	485	1376	26,3	1147
1963	1563	410	1223	26,9	1074
1964	1605	421	1604	26,6	1264
1965	1493	392	1124	26,7	1008
1966	1437	377	1326	27,5	1150
1967	1944	510	1447	27,2	1209
1968	1451	381	1305	26,7	1117
1969	2083	547	1518	26,6	1227
1970	1192	313	1378	27,3	1174
1971	1304	342	1211	26,3	1054
1972	1121	294	1154	26,3	1019
1973	930	244	1143	25,7	1000
1974	1420	373	1408	26,4	1164
1975	1534	403	1356	26,3	1136

Год	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$h, \text{ мм}$	$X, \text{ мм}$	$T, ^\circ\text{C}$	$E, \text{ мм}$
1976	1451	381	1348	26,3	1132
1977	888	233	1154	26,7	1027
1978	1297	341	1355	26,6	1142
1979	1481	389	1442	26,3	1180
1980	876	230	1318	27,0	1135
1981	1108	291	1356	26,4	1139
1982	900	236	1245	26,4	1077
1983	837	220	1010	26,1	921
1984	633	166	1084	27,2	991
1985	910	239	1083	26,6	979
1986	749	196	1374	26,6	1153
1987	739	194	1153	26,7	1027
1988	729	191	1001	26,7	925
1989	636	167	1185	26,5	1042
1990	729	191	1252	26,4	1079

В таблице 24 приведены осредненные гидрометеорологические характеристики (нормы) выбранных водосборов. Местоположение водосборов см. рисунок 5

Из таблицы 24 видно, что большинство рядов наблюдений за гидрометеорологическим режимом рек Африки имеют период с 1951 по 1990 года. Наблюдается, при одной и тоже температуре больше осадков, меньше расходы в маленьких водосборах, следовательно больше испарения.

Коэффициент неустойчивости у большинства рек Африки $\beta > 0,67$, что свидетельствует об неустойчивости выбранных рек, что делает перспективнее дальнейшие исследования.

Таблица 24 – Гидрометеорологические характеристики выбранных речных бассейнов Африки

№ поста	Река – пост		Код поста	F , км ²	Период наблюдений.	Q_{cp} , м ³ /с	h , мм	X , мм	T , °С	E , мм	β
1	Niger	Koulikoro	1134100	120000	1951–1990	1351	355	1352	26,6	1132	1,78
2	Niger	Dire	1134700	340000	1951–1990	965	89	1126	27,4	1017	1,98
3	Senegal	Bakel	1812500	218000	1951–1989	629	90	979	27,3	914	1,91
4	Mono	Athieme	1732100	21575	1951–1989	117	171	1189	25,4	1008	1,46
5	Orange	Vioolsdrif	1159100	866486	1951–1990	208	7	361	21,9	361	1,93
6	Vaal	Elandsfontein engelbrechtsdrift	1159800	38564	1951–1990	45,2	36	829	14,7	595	1,92
7	Klip	Delangesdrift	1159900	4152	1951–1990	6,21	47	790	14,8	582	1,90
8	Bree	Ceres toeken geb.	1160300	657	1951–1990	3,39	162	283	16,0	281	0,96
9	Doring	Elands drift – aspoort	1160320	6895	1951–1990	8,12	37	320	14,9	310	1,59
10	Groot–vis	Brandt legte piggot's bridge	1160510	23067	1951–1990	6,95	9	528	15,3	460	1,84
11	Mtamvuna	Gundrift	1160650	728	1951–1990	5,27	228	903	15,3	635	1,14
12	Mzimkulu	Fp 1609030 the banks	1160680	545	1951–1990	7,65	442	827	14,3	586	–0,27
13	Slangrivier	Vlakdrift	1160800	683	1951–1990	3,09	142	867	21,4	748	1,54
14	Megalies	Scheerpoort	1196350	1171	1951–1990	0,95	25	593	19,3	544	1,93
15	Incomati	Hooggenoeg	1197300	5540	1951–1990	14,0	79	936	19,7	750	1,84
16	Chari	Ndjamena(fort lamy)	1537100	600000	1951–1990	1022	53	802	27,4	773	1,90
17	Okavango / cubango	Mohembo/mtaembo	1357100	410000	1951–1990	330	25	526	22,8	513	1,85

6 ОБЕСПЕЧЕННЫЕ УСЛОВНЫЕ И БЕЗУСЛОВНЫЕ РАСХОДЫ ВОДЫ

Выявление дополнительных фазовых переменных при неустойчивом процессе формирования стока

В РГГМУ разработана методология преодоления неустойчивости путем привлечения дополнительных фазовых переменных (наряду с расходом воды) для статистически устойчивого описания процесса формирования многолетнего речного стока.

Ее суть заключается в следующем. Система уравнений (5) аппроксимирует модель формирования стока в виде уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК), описывающего эволюцию вероятностных распределений марковских случайных процессов. Включение в модель формирования стока новых переменных уменьшает мультипликативный шум за счет перераспределения внешнего воздействия на внутреннюю реакцию бассейна. Вместо одномерного уравнения ФПК приходят к n -мерному:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = - \sum_{i=1}^n \frac{\partial (A_i p)}{\partial Y_i} + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial^2 (B_{ij} p)}{\partial Y_i \partial Y_j}, \quad (14)$$

где p – плотность вероятности;

$\vec{Y} = (Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n)$ – вектор состояния;

A_i, B_{ij} – коэффициенты сноса и диффузии.

Анализом уравнения (14) (см. [23]) было установлено, что устойчивость моментов повышается, если мультипликативная составляющая шума перераспределяется на вновь вводимые фазовые переменные:

$$\operatorname{div} \vec{A} = \sum_{i=1}^n -\bar{c}_{Y_i} (1 - 0,5\beta_{Y_i}) < 0. \quad (15)$$

На вопрос, каким числом фазовых переменных и можно ограничиться отвечает фрактальная диагностика.

В речном бассейне могут быть различные типы взаимодействия между фазовыми переменными. При годовом осреднении уравнение водного баланса имеет вид $\dot{\bar{X}} = \bar{Q} + \bar{E} + \Delta\bar{U}$, т. е. остаются три взаимодействующих переменных, причем расход и испарение конкурируют за ресурс $\dot{X}$, а изменение суммарных влагозапасов ΔU ведет себя нейтрально [17].

Гидрологи интересуются в основном речным стоком (расходом воды). Стохастически обобщая динамическую модель [17]

$$\frac{dQ}{dt} = -\left(\frac{1}{k_Q \times \tau_Q}\right) \times Q + \frac{\dot{X}}{\tau_Q}, \quad (16)$$

приходят к уравнению ФПК и семейству кривых Пирсона (его стационарному решению). Аналогичное уравнение записывают и для испарения:

$$\frac{dE}{dt} = -\left(\frac{1}{k_E \times \tau_E}\right) \times Q + \frac{\dot{X}}{\tau_E}, \quad (17)$$

где

$$K_E = \frac{E}{\dot{X}};$$

τ_E — время релаксации испарительной емкости бассейна.

Статистически обобщая это уравнение, приходят к уравнению ФПК для $p(E)$ с коэффициентами сноса и диффузии:

$$A_E = -(\bar{c}_E - 0.5 \times G_{\tilde{c}_E}) \times E - 0.5 \times G_{\tilde{c}_E \tilde{N}_E} + \bar{N}_E$$

$$B_E = G_{\tilde{c}_E} \times E^2 - 2 \times G_{\tilde{c}_E \tilde{N}_E} + G_{\tilde{N}_E},$$

где $G_{\tilde{c}_E \tilde{N}_E}$ – взаимная интенсивность «испарительных шумов».

Если $G_{\tilde{c}_E} \ll \bar{c}_E$ и, $\bar{c}_Q \gg G_{\tilde{c}_Q}$ предметные области: стоковая и испарительная рассматриваются независимо друг от друга, а в противном случае их надо рассматривать совместно. Учитывая, что $k_Q = \frac{Q}{(Q + E + \Delta U)}$,

$k_E = \frac{E}{(Q + E + \Delta U)}$, уравнения (13) и (14) записывают так:

$$\frac{dQ}{dt} = - \left(\frac{Q + E + \Delta U}{\tau_Q} \right) + \frac{\dot{X}}{\tau_Q}; \quad (18)$$

$$\frac{dE}{dt} = - \left(\frac{Q + E + \Delta U}{\tau_E} \right) + \frac{\dot{X}}{\tau_E}. \quad (19)$$

Введя в (18) и (19) шумы:

$$\frac{dQ}{dt} = - (\bar{c}_Q + \tilde{c}_Q) \times (Q + E + \Delta U) + \bar{N}_Q + \tilde{N}_Q; \quad (20)$$

$$\frac{dE}{dt} = - (\bar{c}_E + \tilde{c}_E) \times (Q + E + \Delta U) + \bar{N}_E + \tilde{N}_E. \quad (21)$$

Коэффициентами $c_Q = \bar{c}_Q + \tilde{c}_Q$ и $c_E = \bar{c}_E + \tilde{c}_E$ учитываются вариации c_Q и τ_E , а также неучтенного (явно) влияния других факторов формирования

стока. Величинами $\tilde{N}_Q$ и $\tilde{N}_E$, учитываются вариации внешних воздействий, которые коррелируются с $\tilde{c}_Q$ и $\tilde{c}_E$.

Более сложная ситуация с третьей фазовой переменной – изменением суммарных влагозапасов в речном бассейне ΔU . Если поступающие в бассейн ресурсы ($\dot{X}$) большие ($\dot{X} > Q - E$), то $\Delta U > 0$; иначе $\Delta U < 0$. Почвогрунты бассейна играют роль релейной следящей системы, которую описывают уравнением:

$$\frac{d(\Delta U)}{dt} = -(\bar{c} + \tilde{c})\text{sgn}(\Delta U) + \bar{N} + \tilde{N} \quad (22)$$

где $\text{sgn}(\Delta U)$ – знаковая функция (+1) при $\Delta U > 0$, –1 при $\Delta U < 0$);

$$\dot{N} = N = \dot{X} - Q - E$$

Параметр c можно интерпретировать как скорость насыщения (или водоотдачи) почвогрунтов речного бассейна. Системе уравнений (20), (21) и (22) статистически эквивалентно уравнение ФПК для совместной плотности вероятности $p(Q, E, \Delta U; t)$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\sum_{i=1}^n \frac{\partial(A_i p)}{\partial Q_i} + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial^2(B_{ij} p)}{\partial Q_i \partial Q_j}, \quad (23)$$

где $Q_1 = Q$;

$Q_2 = E$;

$Q_3 = \Delta U$.

Коэффициенты сноса A_i и диффузии B_{ij} определяются формулами:

$$\begin{aligned}
A_Q &= -(\bar{c}_Q - 0.5G_{\tilde{c}_Q})(Q + E + \Delta U) - 0.5G_{\tilde{c}_Q\tilde{N}_Q} + \bar{N}; \\
A_E &= -(\bar{c}_E - 0.5G_{\tilde{c}_E})(Q + E + \Delta U) - 0.5G_{\tilde{c}_E\tilde{N}_E} + \bar{N}; \\
A_{\Delta U} &= -\bar{c}_{\Delta U} \operatorname{sgn}(\Delta U) + \delta(\Delta U)[G_{\tilde{c}_{\Delta U}} \operatorname{sgn}(\Delta U) - G_{\tilde{c}\tilde{N}} + \bar{N}] \\
B_Q &= G_{\tilde{c}_Q} Q^2 - 2G_{\tilde{c}_Q\tilde{N}_Q} + G_{\tilde{N}_Q}; \\
B_E &= G_{\tilde{c}_E} E^2 - 2G_{\tilde{c}_E\tilde{N}_E} + G_{\tilde{N}_E}; \\
B_{\Delta U} &= G_{\tilde{c}} - 2G_{\tilde{c}\tilde{N}} \operatorname{sgn}(\Delta U) + G_{\tilde{N}} \\
B_{QE} &= B_{Q\Delta U} = B_{E\Delta U} = 0
\end{aligned}$$

Новые фазовые переменные: E и ΔU вводятся для того, чтобы ликвидировать толстый «хвост» (т. е. неустойчивость по дисперсии) у распределения $p(Q)$. Следовательно, для того, чтобы убедиться, что распределение $p(Q, E, \Delta U; t)$ имеет тонкий (трехмерный) «хвост», надо показать, что в расширенной системе процесс формирования расхода устойчив по дисперсии.

При игнорировании испарения двумерное поле (Q, E) проектируется на ось расходов. При этом происходит смещение точек; «хвост» распределения $p(Q)$ «поднимается». Переход к плоскости (Q, E) «размазывает» точки по ней, и получается двумерное распределение $p(Q, E)$ с «опущенным» (но уже двумерным) «хвостом» (т.е. устойчивость по дисперсии фазовых переменных).

«Смысл объединения в том, что интегрированная (стоковая и испарительная) предметная область испытывает меньше влияния «инфинитной реальности», чем каждая из них в отдельности (они обе стали финитным ядром

многомерной модели). Если бы кроме них ничего не было, то система стала бы полностью мультипликативно замкнутой, и мы перешли бы к нормальному двумерному распределению $p(Q, E)$ (симметричному «колокольчику»), заведомо ликвидировав толстый «хвост».» [17].

Формирование устойчивых вероятностных распределений многолетнего годового стока и получение его обеспеченных значений

Для получения распределения $p(Q, E)$ необходимо наряду с расходами воды иметь ряды испарения с поверхности речного бассейна, для получения которых была использована формула Тюрка. На рисунке 13 приведен пример полученного подобным образом двумерного распределения $p(Q, E)$.

Для описания процесса формирования стока используют статистические моменты. В данном случае ограничимся несколькими первыми начальными моментами и одномерными безусловными и условными распределениями. В таком случае достаточно получить эмпирические двумерные гistogramмы, например, показанными на рисунке 13. Проецируя ее на плоскость (h, E) получим поле («эллипс») рассеяния, рисунок 14.

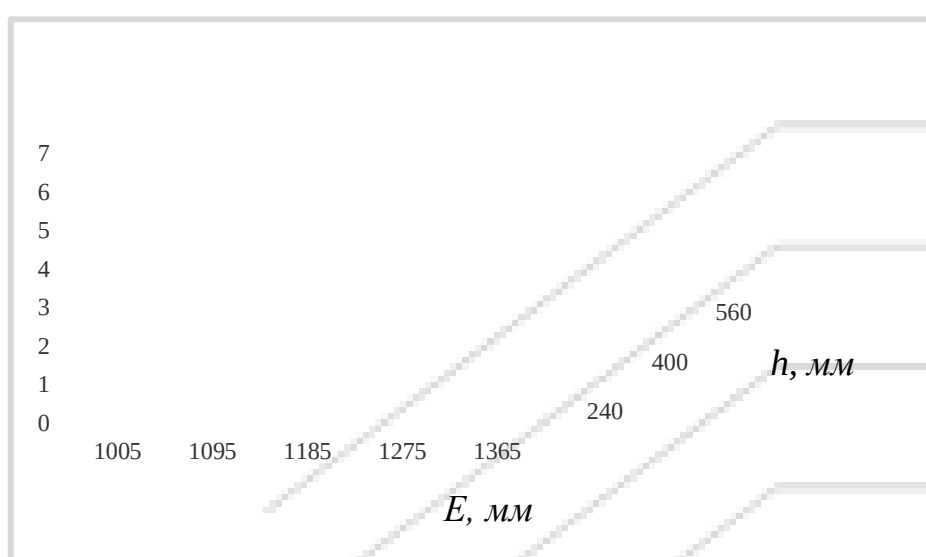


Рисунок 13 – Двумерная гистограмма р. Niger, станция Koulikoro.

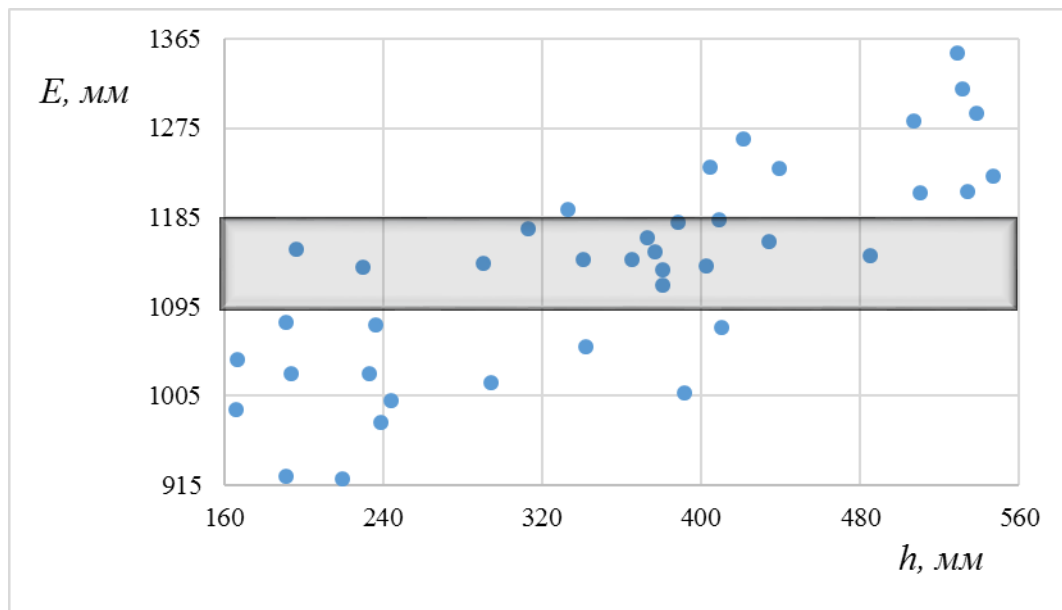


Рисунок 14 – Рассеяние эмпирических точек на плоскости (h, E) , р. Niger, станция Koulikoro.

Если спроецировать все точки (безотносительно к значениям E) на ось расходов, а затем стандартным методом обработать их и построить одномерную гистограмму, то тем самым получим безусловное эмпирическое распределение. С ним можно дальше поступать, как рекомендуется в стандартных гидрорасчетах. Аналогично можно обработать точки, находящиеся в заштрихованном интервале испарений, соответствующих среднему его значению $\bar{E}$. Тем самым мы получим условное $p(h/E=\bar{E})$ распределение. Далее можно находить нормы, C_v и C_s , соответствующие условным и безусловным распределениям и экстраполировать кривые обеспеченности в область малых обеспеченностей (рисунок 15).

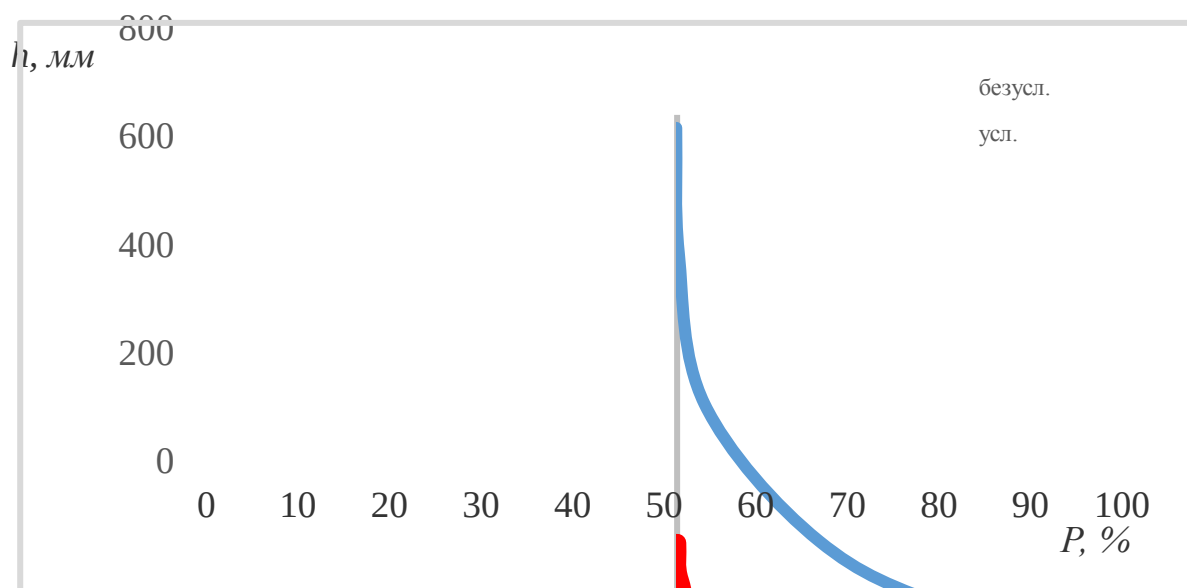
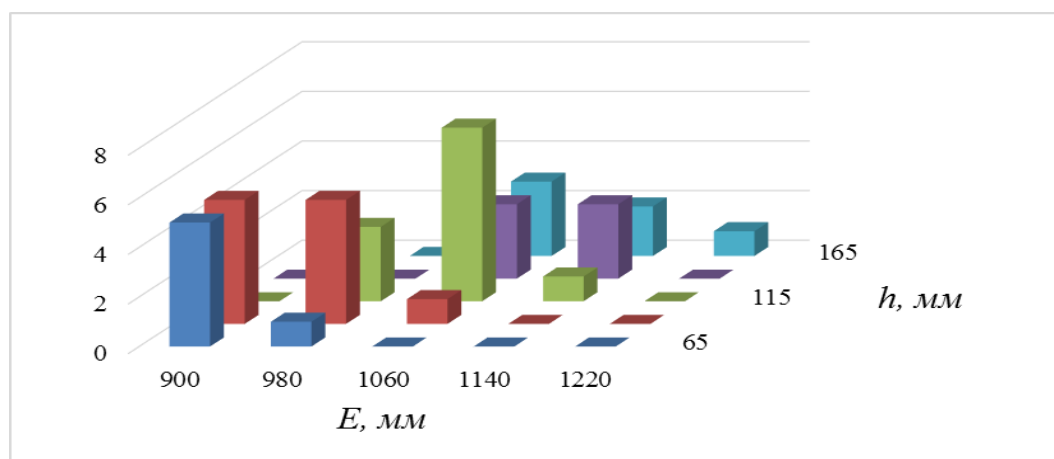


Рисунок 15 – Прижатые хвосты условного распределения (штриховая линия) при экстраполяции распределения в зону малых обеспеченностей, р. Niger–Koulikoro.

Оценки обеспеченных значений годового стока

Для получения обеспеченных значений годового стока были построены эмпирические двумерные гистограммы (рисунок 16), а также распределения Пирсона 3–го типа условные и безусловные (рисунок 17). Для получения условных распределений и гистограмм использовались среднегодовые значения слоя стока совместно со значениями среднегодового испарения.

а)



6)

д)

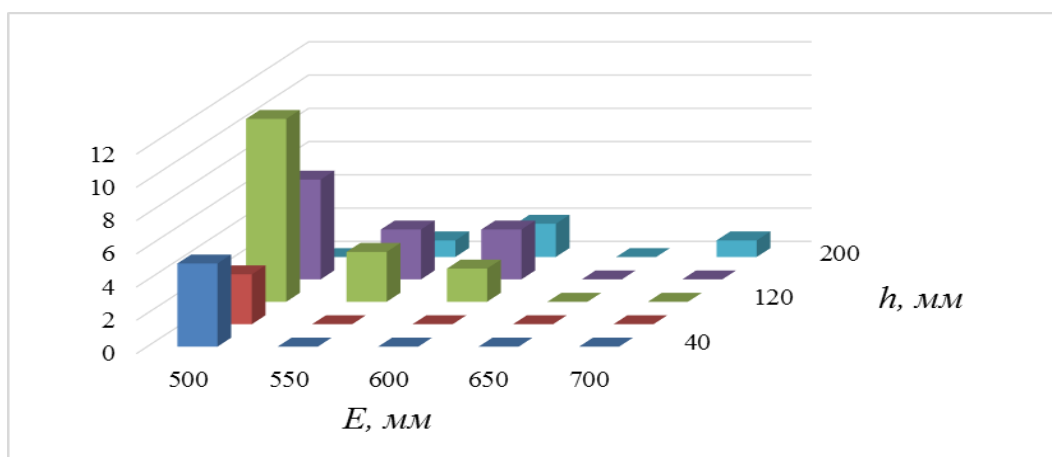
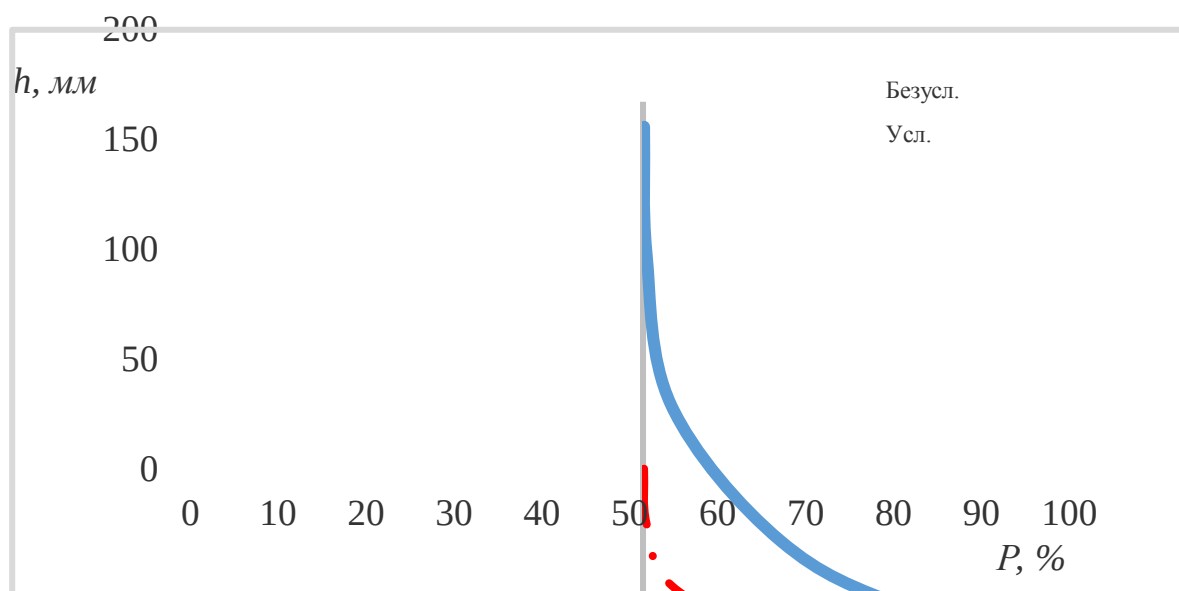
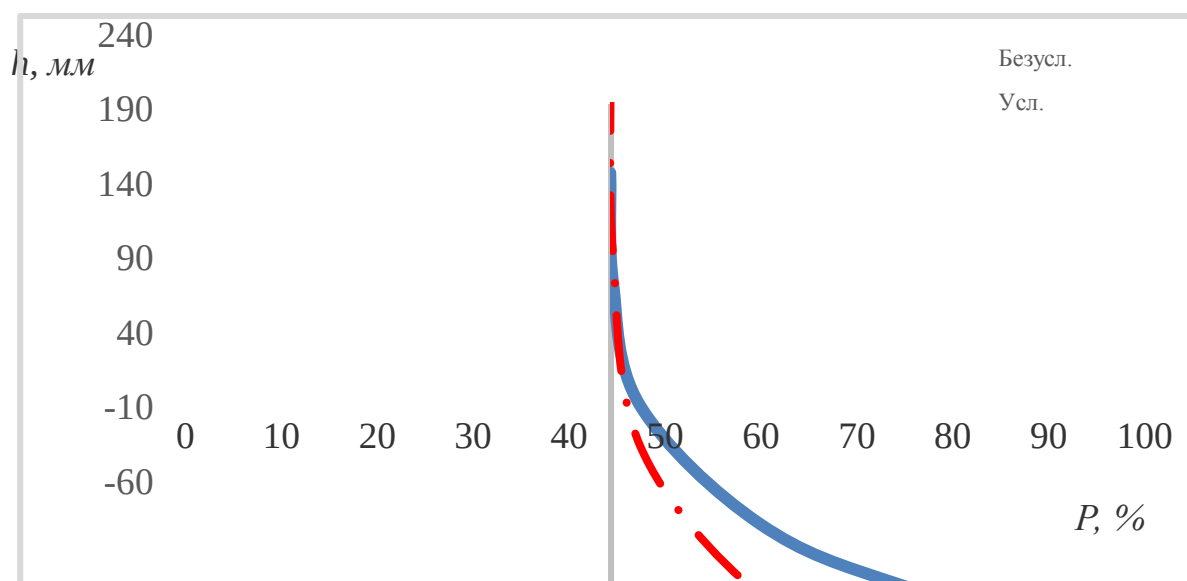


Рисунок 16 – Двумерные гистограммы: *a* – р. Niger, станция Dire; *б* – р. Senegal, ст. Baker; *в* – р. Orange, ст. Viooslsdrif; *г* – р. Vaal, ст. E.E.; *д* – р. Klip ст. Delangesdrift.

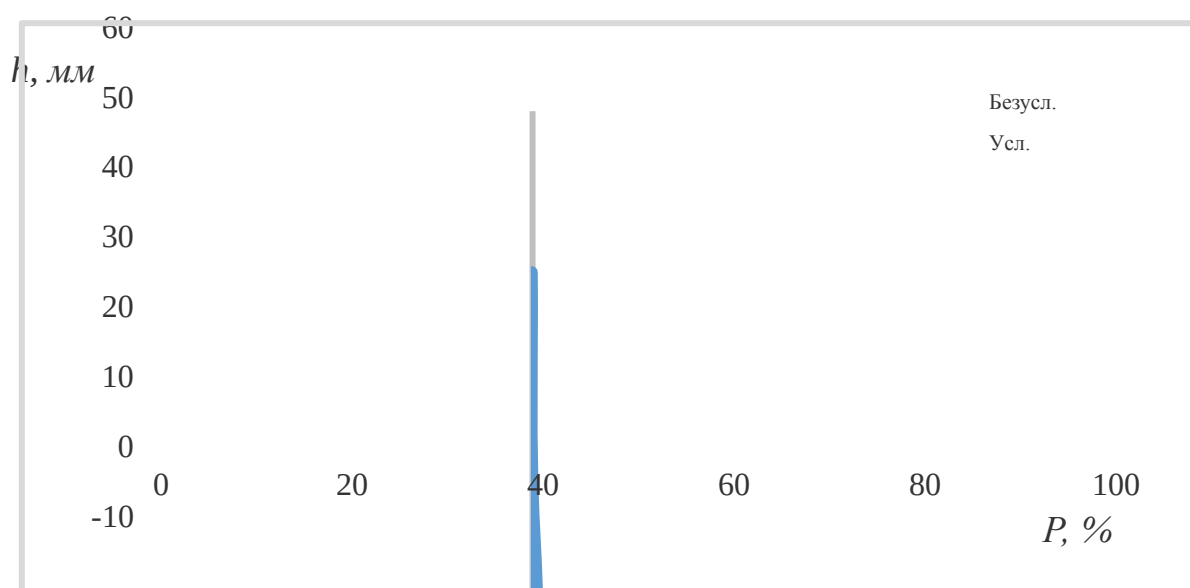
а)



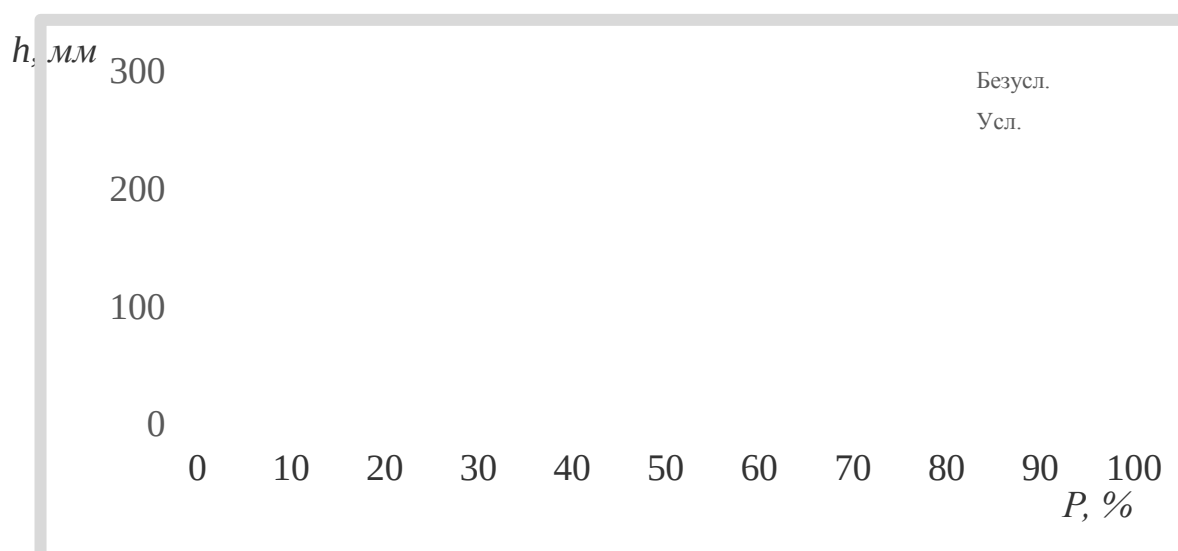
б)



в)



з)



д)

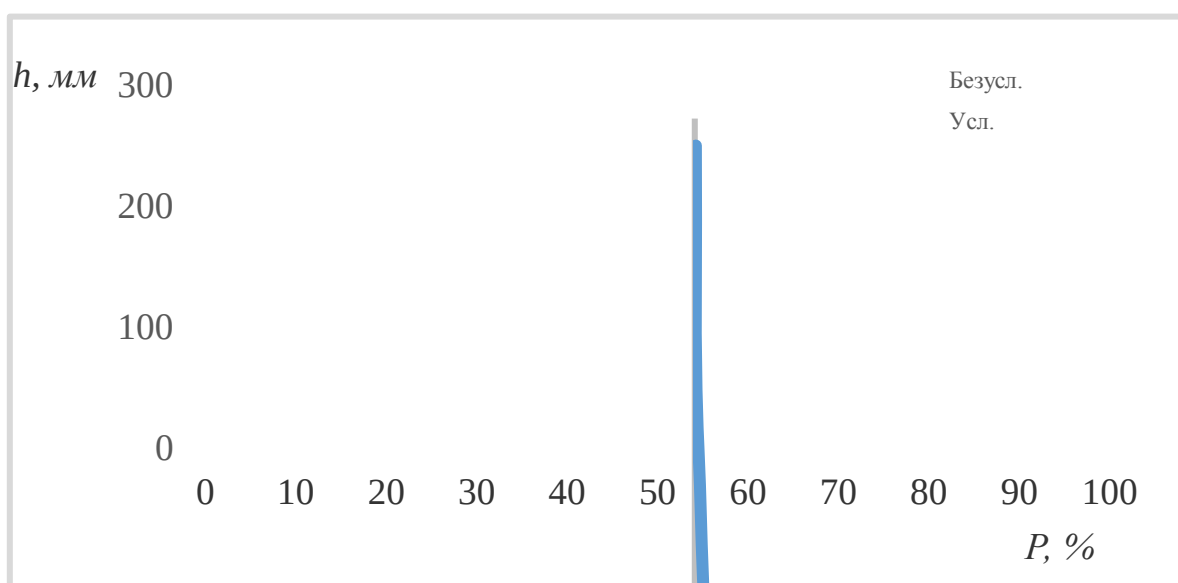


Рисунок 17 – Условная и безусловная кривая обеспеченности Пирсона

3-го типа: *a* – р. Niger, станция Dire; *б* – р. Senegal, ст. Baker; *в* – р. Orange, ст. Viooslsdrif; *з* – р. Vaal, ст. E.E.; *д* – р. Klip ст. Delangesdrift.

Таблица 25 – Оценки годового стока 0,01 %-ной обеспеченности, полученной по различным вариантам распределений

№ поста	β	Река – пост		Код поста	Пирсона 3 типа		
					Безусл.	Усл.	δ , %
1	1,78	Niger	Koulikoro	1134100	792	546	31
2	1,98	Niger	Dire	1134700	196	146	25
3	1,91	Senegal	Bakel	1812500	235	256	–9
4	1,46	Mono	Athieme	1732100	171	391	–128
5	1,93	Orange	Vioolsdrif	1159100	53	33	36
6	1,92	Vaal	Elandsfontein engelbrechtsdrift	1159800	303	96	68
7	1,90	Klip	Delangesdrift	1159900	343	160	53
8	0,96	Bree	Ceres toeken geb.	1160300	777	655	16
9	1,59	Doring	Elands drift – aspoort	1160320	209	198	5
10	1,84	Groot–vis	Brandt legte piggot's bridge	1160510	9	55	–477
11	1,14	Mtamvuna	Gundrift	1160650	846	600	29
12	–0,27	Mzimkulu	Fp 1609030 the banks	1160680	1245	900	28
13	1,54	Slangrivier	Vlakdrift	1160800	441	404	8
14	1,93	Megalies	Scheerpoort	1196350	289	133	54
15	1,84	Incomati	Hooggenoeg	1197300	220	196	11
16	1,90	Chari	Ndjamena(fort lamy)	1537100	216	104	52
17	1,85	Okavango / cubango	Mohembo/mtaembo	1357100	57	50	12
					δ_{cp}		–11
					$ \delta _{cp}$		61

Таблица 26 – Оценки годового стока 0,1 %-ной обеспеченности, полученной по различным вариантам распределений

№	β	Река – пост		Код поста	Пирсона 3 типа		
					Безусл.	Усл.	δ , %
1	1,78	Niger	Koulikoro	1134100	718	524	27
2	1,98	Niger	Dire	1134700	178	138	22
3	1,91	Senegal	Bakel	1812500	212	218	–3
4	1,46	Mono	Athieme	1732100	171	339	–98
5	1,93	Orange	Violsdrif	1159100	41	27	34
6	1,92	Vaal	Elandsfontein engelbrechtsdrift	1159800	228	80	65
7	1,90	Klip	Delangesdrift	1159900	263	131	50
8	0,96	Bree	Ceres toeken geb.	1160300	621	541	13
9	1,59	Doring	Elands drift – aspoort	1160320	166	159	4
10	1,84	Groot–vis	Brandt legte piggot's bridge	1160510	9	45	–369
11	1,14	Mtamvuna	Gundrift	1160650	700	515	26
12	–0,27	Mzimkulu	Fp 1609030 the banks	1160680	1059	803	24
13	1,54	Slangrivier	Vlakdrift	1160800	390	365	7
14	1,93	Megalies	Scheerpoort	1196350	213	103	52
15	1,84	Incomati	Hooggenoeg	1197300	191	172	10
16	1,90	Chari	Ndjamena(fort lamy)	1537100	176	93	47
17	1,85	Okavango / cubango	Mohembo/mtaembo	1357100	50	44	11
					δ_{cp}		–5
					$ \delta _{cp}$		51

Таблица 27 – Оценки годового стока 1 %-ной обеспеченности, полученной по различным вариантам распределений

№	β	Река – пост		Код поста	Пирсона 3 типа		
					Безусл.	Усл.	δ , %
1	1,78	Niger	Koulikoro	1134100	628	495	21
2	1,98	Niger	Dire	1134700	156	129	17
3	1,91	Senegal	Bakel	1812500	185	177	5
4	1,46	Mono	Athieme	1732100	171	280	–63
5	1,93	Orange	Violsdrif	1159100	28	20	29
6	1,92	Vaal	Elandsfontein engelbrechtsdrift	1159800	153	63	59
7	1,90	Klip	Delangesdrift	1159900	182	100	45
8	0,96	Bree	Ceres toeken geb.	1160300	460	419	9
9	1,59	Doring	Elands drift – aspoort	1160320	122	119	3
10	1,84	Groot–vis	Brandt legte piggot's bridge	1160510	9	33	–252
11	1,14	Mtamvuna	Gundrift	1160650	545	422	22
12	–0,27	Mzimkulu	Fp 1609030 the banks	1160680	861	695	19
13	1,54	Slangrivier	Vlakdrift	1160800	330	320	3
14	1,93	Megalies	Scheerpoort	1196350	137	72	47
15	1,84	Incomati	Hooggenoeg	1197300	160	144	10
16	1,90	Chari	Ndjamena(fort lamy)	1537100	134	81	40
17	1,85	Okavango / cubango	Mohembo/mtaembo	1357100	42	38	8
					δ_{cp}		1
					$ \delta _{cp}$		38

Таблица 28 – Оценки годового стока 5 %-ной обеспеченности, полученной по различным вариантам распределений

№ поста	β	Река – пост		Код поста	Пирсона 3 типа		
					Безусл.	Усл.	δ , %
1	1,78	Niger	Koulikoro	1134100	547	462	16
2	1,98	Niger	Dire	1134700	136	121	11
3	1,91	Senegal	Bakel	1812500	160	144	9
4	1,46	Mono	Athieme	1732100	171	231	–35
5	1,93	Orange	Vioolsdrif	1159100	20	15	23
6	1,92	Vaal	Elandsfontein engelbrechtsdrift	1159800	101	49	51
7	1,90	Klip	Delangesdrift	1159900	124	76	38
8	0,96	Bree	Ceres toeken geb.	1160300	342	327	5
9	1,59	Doring	Elands drift – aspoort	1160320	89	88	1
10	1,84	Groot–vis	Brandt legte piggot's bridge	1160510	9	25	–161
11	1,14	Mtamvuna	Gundrift	1160650	427	349	18
12	–0,27	Mzimkulu	Fp 1609030 the banks	1160680	708	607	14
13	1,54	Slangrivier	Vlakdrift	1160800	275	277	–1
14	1,93	Megalies	Scheerpoort	1196350	87	50	42
15	1,84	Incomati	Hooggenoeg	1197300	134	123	8
16	1,90	Chari	Ndjamena(fort lamy)	1537100	103	70	32
17	1,85	Okavango / cubango	Mohembo/mtaembo	1357100	36	34	5
					δ_{cp}		5
					$ \delta _{cp}$		28

В таблицах 25–28 приведены результаты вычислений слоя стока 0,01 %; 0,1 %; 1 %; 5 % обеспеченности соответственно по безусловным и условным распределениям для бассейнов рек Африки и рассчитаны относительные их отклонения по формуле $\delta = ((\text{Безусл.} - \text{Усл.}) / \text{Безусл.}) * 100\%$. Затем эти отклонения были осреднены по формулам $\delta_{\text{ср}} = \Sigma \delta / n$ и $|\delta|_{\text{ср}} = \Sigma |\delta| / n$.

Из таблиц 25–28 видно, что значение $|\delta|_{\text{ср}}$ варьируется от 28 до 61 %, причем $|\delta|_{\text{ср}}$ существенно выше значение $\delta_{\text{ср}}$.

Остальные обеспеченности приведены в приложении А.

В таблице 29 приведена обобщенная информация по средним отклонениям условных распределений Пирсона 3-го типа от безусловных по бассейнам рек Африки.

Таблица 29 – Средние отклонения условных распределений Пирсона 3-го типа от безусловных

P, %	Отклонение, %	
	$\delta_{\text{ср}}$	$ \delta _{\text{ср}}$
0,01	-11	61
0,1	-5	51
1	1	38
5	5	28
10	5	22
20	5	15
30	5	11
50	2	7
70	-3	15
80	-7	24
90	-11	38
95	-26	69
97	-7	135
99	27	123
99,9	274	441

Из таблицы 29 видно, что средние отклонения условных распределений Пирсона 3-го типа от безусловных имеют отрицательные значения и варьи-

руются от 1 до 30 для $\delta_{\text{ср}}$ и от 7 до 135 для $|\delta|_{\text{ср}}$. Также нужно отметить, что значение $|\delta|_{\text{ср}}$ увеличивается с увеличением обеспеченности при одной и той же $\delta_{\text{ср}}$. При 0,1-% ной обеспеченности, значение $\delta_{\text{ср}}$ ближе к 5; а при 50-% ной, $\delta = 2$, что для гидрологов значимо. В отличие от многообразия вариации отклонения $\delta_{\text{ср}}$, значение $|\delta|_{\text{ср}}$ обратно пропорционально значениям обеспеченности с 0,01 % до 50% и пропорционально им с 70% до 99,9% за исключением 99%-ной обеспеченности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена методика получения статистически устойчивых оценок обеспеченных расходов воды путем перехода к многомерным распределениям. Она включает: а) метод генерирования рядов испарения с поверхности речных водосборов, основанный на связи испарения с температурой и осадками, установленной Тюрком; б) построение двумерных распределений плотности вероятности; в) переход от двумерных к одномерным, но условным распределениям.

На основе расчетов, выполненных для бассейнов рек Африки, установлено следующее:

- даны ретроспективные долгосрочные прогнозы вероятностных характеристик годового стока Африки;
- проверена возможность использования методики сценарной оценки изменения климата в африканских условиях;
- сгенерированы ряды испарения для неострых водосборов рек Африки методом Тюрка;
- построены двумерные гистограммы;
- рассчитаны условные и безусловные обеспеченные значения слоя стока, сделан сравнительный анализ этих значений.

Печатные работы автора диссертации представлены в списке литературы с [23] по [25].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Коваленко, В.В. Моделирование гидрологических процессов [Текст] / учебник. / В.В. Коваленко.—СПб.: Изд. РГГМУ, 1996.—239 с.
- 2 Коваленко, В. В. Гидрологическое обеспечение надежности строительных проектов при изменении климата [Текст] / В.В. Коваленко.—СПб.: изд. РГГМУ, 2009.—100 с.
- 3 Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате [Текст] / Под ред. В.В. Коваленко. – СПб.: изд. РГГМУ, 2010.—50 с.
- 4 Коваленко, В.В. Моделирование гидрологических процессов. Учебник. Изд. 2-е исправ. и доп. / В. В. Коваленко, Н. В. Викторова, Е. В. Гайдукова. – СПб., изд. РГГМУ, 2006. – 559 с.
- 5 Расходы воды избранных рек мира Издано в 1993 для ЮНЕСКО. [Текст] – СПб.: Париж: Гидрометеиздат, 1993. – 600 с.
- 6 Чеботарев, А. И. Общая гидрология. [Текст] / А. И. Чеботарев.— Л.: Гидрометеиздат, 1975.—544 с.
- 7 Орлов, В. Г. Основы инженерной гидрологии. [Текст] / В. Г. Орлов, А. В. Сикан – СПб.: изд. РГГМУ, 2004.— 156 с.
- 8 Атлас. География материков и океанов. [Текст] – М.: Изд. «ДИК», 2007. – С.10–40.
- 9 Microsoft Encarta premium 2006. [электронный ресурс] / Microsoft. Microsoft Corporation, 1993–2005. – Режим доступа: <http://www.encarta.com>.
- 10 Атлас Мирового водного баланса. [Карты].– М.: Гидрометеиздат, 1974.
- 11 Атлас мира. [Текст].– Лондон–Нью–Йорк–Монреаль–Москва: Ридерз Дайджест, 2002.

- 12 http://www.ipcc-data.org/cgi-bin/ddc_nav/dataset=ar4_gcm [электронный ресурс].
- 13 Георгиевский, Ю. М. Гидрологические прогнозы. [Текст] / Ю.М. Георгиевский, С. В. Шаночкин. – СПб.: изд-во РГГМУ, 2007. – с. 436.
- 14 <http://egfak.narod.ru/sm.htm> [электронный ресурс].
- 15 Коваленко, В. В. Частично инфинитное моделирование и прогнозирование процессов развития [Текст] / В. В. Коваленко. – СПб.: изд. РГГМУ, 1998. – 113 с.
- 16 Коваленко, В. В. Критерии устойчивого развития гидрологических процессов и картирование ожидаемых зон аномалий параметров годового стока рек СНГ при антропогенном изменении климата [Текст] / В. В. Коваленко, В. А. Хаустов / Метеорология и гидрология, 1998, № 12, с. 86–102.
- 17 Коваленко, В. В. Обеспечение устойчивости моделирования и прогнозирования речного стока методами частично инфинитной гидрологии [Текст] / В. В. Коваленко. – СПб.: изд. РГГМУ, 2011. – 107 с.
- 18 Коваленко, В.В., Гайдукова, Е.В., Викторова Н.В. Практикум по дисциплине «Моделирование гидрологических процессов. Часть II. Стохастические модели» (на базе языка C++). Учебное пособие [Текст] / В. В. Коваленко, Н. В. Викторова, Е. В. Гайдукова. – СПб.: изд. РГГМУ, 2012. – 248 с.
- 19 Гайдукова, Е. В. Оценка гидрологических характеристик годового стока рек Юго–Западной Африки [Текст] / Е. В. Гайдукова, М. Куасси. // Технические науки – от теории к практике, 2013, № 28. – С. 141–151.
- 20 Коваленко, В.В. Прогнозирование изменений фрактальной размерности многолетнего речного стока [Текст] / В. В. Коваленко, Е. В. Гайдукова, К.Б.Г. Арман // География и природные ресурсы, 2008, № 4. – С. 136–143.
- 21 Гайдукова, Е. В. Критический анализ методов расчета суммарного испарения для речных бассейнов Африки [Текст] / Е. В. Гайдукова, Х. Диаван

- ра, Э.С. Бонгу // Теория и практика современной науки: XVI Международная научно–практическая конференция / Науч.–инф. издат. Центр «Институт стратегических исследований».– Москва: Изд–во «Институт стратегических исследований», 2014.– с 531–537.
- 22 Коваленко, В. В. Частично инфинитное моделирование: примеры, основания, парадоксы. – СПб.: Политехника, 2005. – 486 с.
- 23 Бонгу Сотима Эрнесто, Диавара Хамиду, Синкпеун Люсьен Сценарная оценка климатических характеристик Африки [Текст] // Материалы XI международного Большого географического фестиваля (БГФ–2015) студентов и молодых ученых. – СПб.: изд–во СПбГУ, 2015. – С. 509–514.
- 24 Синкпеун, Люсьен. Использование геоинформационных систем (гис) для управления распределительной сетью воды в Бенине (г. Котону) [Текст] / Л. Синкпеун // Материалы Региональной информатики «РИ–2012» юбилейной XIII Санкт–Петербургской международной конференции. – СПб.: изд–во СПОИСУ, 2012. – С 333–334.
- 25 Синкпеун, Люсьен. Представление о воде в древнегреческой мифологии и философии досократиков [Текст] / Л. Синкпеун // Материалы VI Всероссийской научно–практической конференции. –Томск.: изд–во ТПУ, 2013. – С. 305–308.

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Обеспеченные значения слоя стока

Таблица А.1 – Результаты вычислений слоя стока 10%, 20%, 30%, 50%, 70%, 80%, 90%, 95%, 97%, 99% и 99,9%- ной обеспеченности соответственно по безусловным и условным распределениям для бассейнов рек Африки и рассчитанные относительные их отклонения

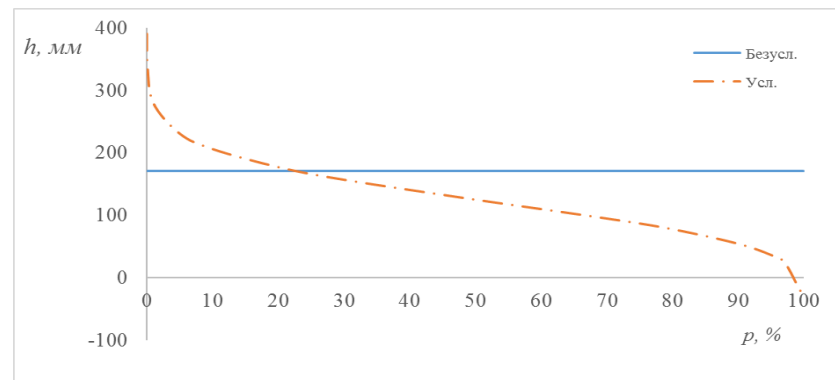
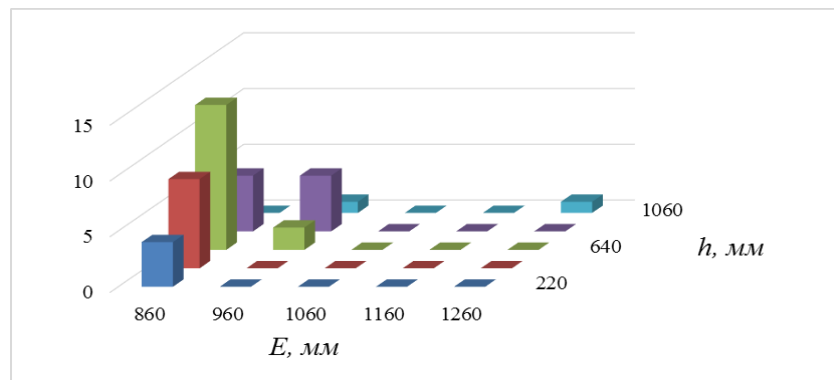
№	β	Код поста	10			20			30			50			70		
			Безусл.	Усл.	δ, %	Безусл.	Усл.	δ, %	Безусл.	Усл.	δ, %	Безусл.	Усл.	δ, %	Безусл.	Усл.	δ, %
1	1,78	1134100	505	443	12	453	416	8	416	395	5	355	355	0	294	312	–6
2	1,98	1134700	125	116	7	113	111	2	104	106	–2	89	99	–11	75	91	–23
3	1,91	1812500	146	129	11	128	112	12	115	101	12	93	84	9	69	70	–1
4	1,46	1732100	171	206	–20	171	177	–4	171	157	8	171	125	27	171	95	45
5	1,93	1159100	16	13	19	12	10	14	9	8	10	6	6	1	4	4	–7
6	1,92	1159800	77	43	45	55	36	35	42	31	27	26	23	11	17	17	–2
7	1,90	1159900	99	65	34	73	53	26	57	46	20	37	34	6	22	25	–12
8	0,96	1160300	287	283	2	229	234	–2	193	202	–5	143	157	–9	103	117	–13
9	1,59	1160320	73	73	1	57	57	0	47	47	0	32	32	1	20	19	6
10	1,84	1160510	9	21	–118	9	16	–69	9	13	–37	9	8	11	9	5	53
11	1,14	1160650	371	313	15	310	273	12	270	246	9	212	205	4	163	168	–3
12	–0,27	1160680	635	562	11	554	511	8	501	474	5	423	418	1	356	366	–3
13	1,54	1160800	246	254	–3	211	224	–6	185	202	–9	143	164	–15	100	124	–24
14	1,93	1196350	63	40	36	41	30	26	29	24	18	15	15	–4	7	9	–33
15	1,84	1197300	120	112	7	105	99	5	94	91	4	78	78	0	62	66	–6
16	1,90	1537100	88	65	27	73	58	20	63	54	14	49	46	5	38	39	–5
17	1,85	1357100	33	32	4	30	29	1	28	28	–1	25	26	–5	22	24	–10
			δср		5	δср		5	δср		5	δср		2	δср		–3
			δ ср		5	δ ср		5	δ ср		5	δ ср		2	δ ср		3

Продолжение таблицы А.1

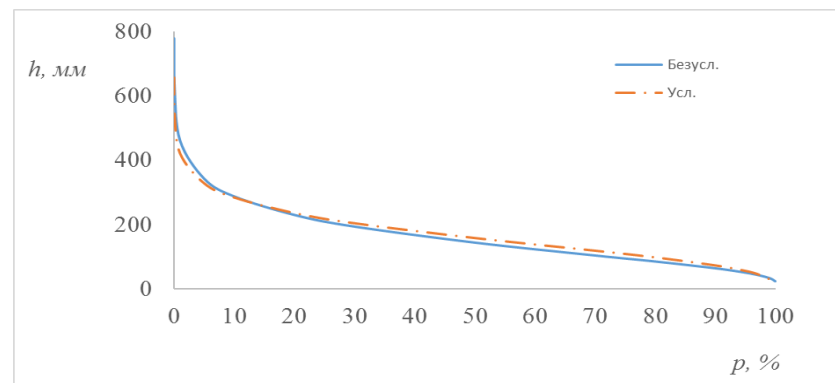
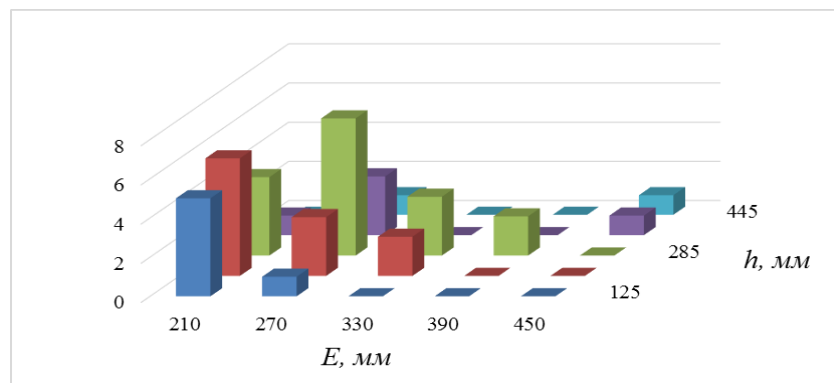
№	β	Код поста	80			90			95			97			99			99,9		
			Безусл.	Усл.	δ, %	Безусл.	Усл.	δ, %	Безусл.	Усл.	δ, %	Безусл.	Усл.	δ, %	Безусл.	Усл.	δ, %	Безусл.	Усл.	δ, %
1	1,78	1134100	256	282	−10	205	239	−17	162	200	−23	134	174	−29	80	121	−50	−7	19	370
2	1,98	1134700	66	87	−32	54	80	−50	44	75	−71	37	71	−92	22	64	−196	4	51	−1201
3	1,91	1812500	55	62	−14	34	53	−56	16	46	−190	4	42	−884	−19	35	289	−60	27	144
4	1,46	1732100	171	78	55	171	54	68	171	36	79	171	25	85	171	−13	107	171	−30	117
5	1,93	1159100	3	3	−11	2	2	−9	1	1	5	1	0	38	0	0	222	0	−1	2723
6	1,92	1159800	13	13	−2	10	9	15	9	6	38	9	4	57	9	0	96	8	−4	151
7	1,90	1159900	16	20	−27	10	14	−45	6	10	−64	5	8	−72	3	4	−43	2	0	98
8	0,96	1160300	85	97	−14	64	71	−12	50	55	−9	43	44	−3	33	28	16	23	7	68
9	1,59	1160320	14	12	14	8	4	43	3	−1	126	1	−4	512	−2	−9	−258	−6	−15	−138
10	1,84	1160510	9	2	75	9	0	103	9	−2	122	9	−3	135	9	−5	155	9	−8	181
11	1,14	1160650	137	148	−8	107	122	−14	86	103	−21	74	91	−24	54	71	−33	30	43	−44
12	−0,27	1160680	319	337	−6	275	297	−8	246	266	−8	227	247	−9	196	205	−4	158	158	0
13	1,54	1160800	74	99	−34	38	63	−68	8	33	−315	−12	13	209	−49	−26	46	−113	−97	14
14	1,93	1196350	4	6	−64	2	3	−81	1	1	−30	0	0	50	0	−1	295	0	−2	473
15	1,84	1197300	53	59	−12	41	51	−23	32	44	−39	26	40	−54	11	33	−205	−1	22	1707
16	1,90	1537100	32	35	−10	26	30	−16	21	25	−19	19	22	−19	15	9	44	12	8	29
17	1,85	1357100	21	23	−13	19	22	−17	18	22	−21	17	21	−23	16	21	−28	15	20	−35
			δcp		−7	δcp		−11	δcp		−26	δcp		−7	δcp		27	δcp		274
			δ cp		7	δ cp		11	δ cp		26	δ cp		7	δ cp		27	δ cp		274

ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Гистограммы и кривые обеспеченностей

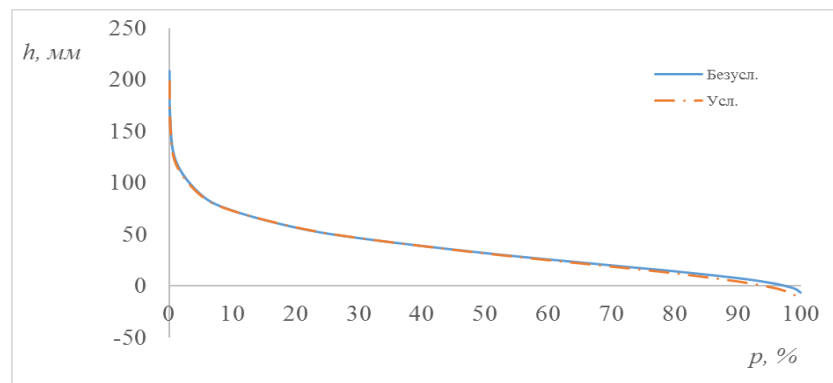
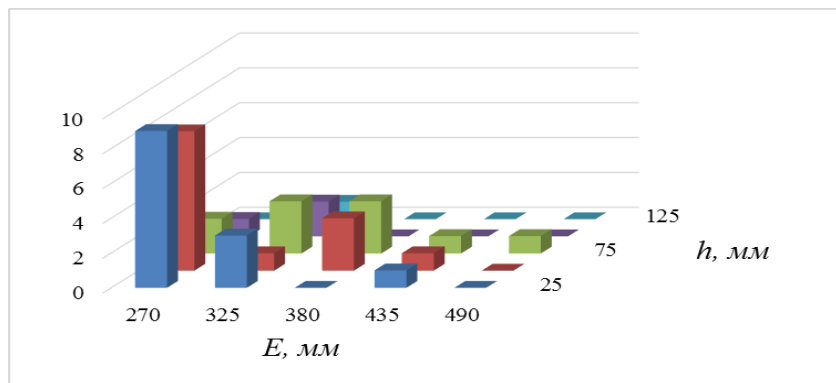
а)



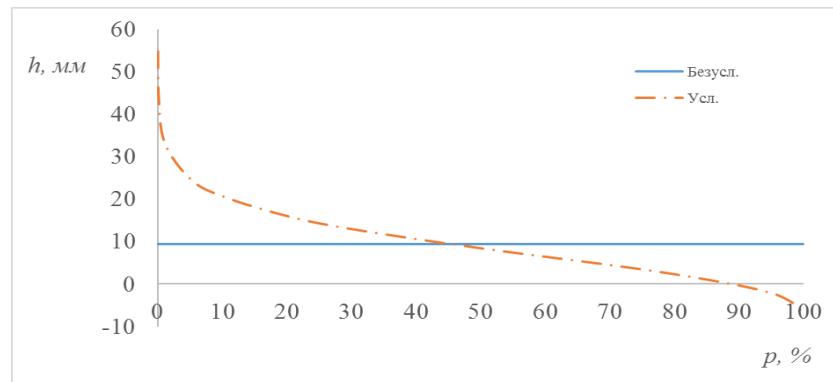
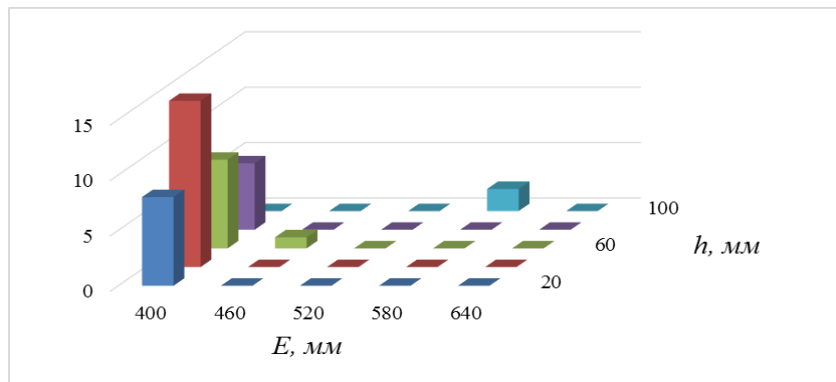
б)



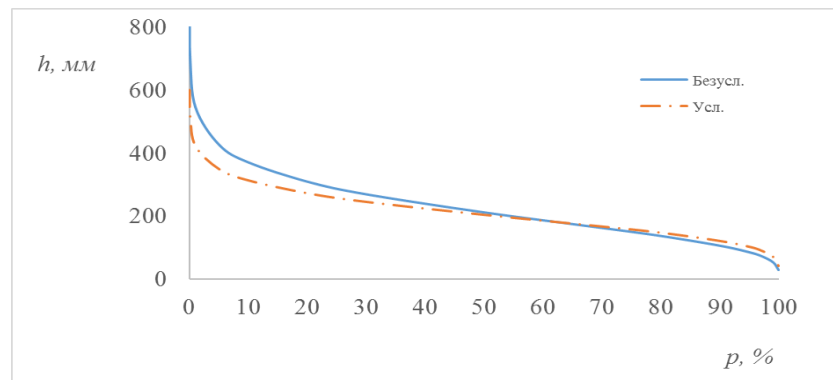
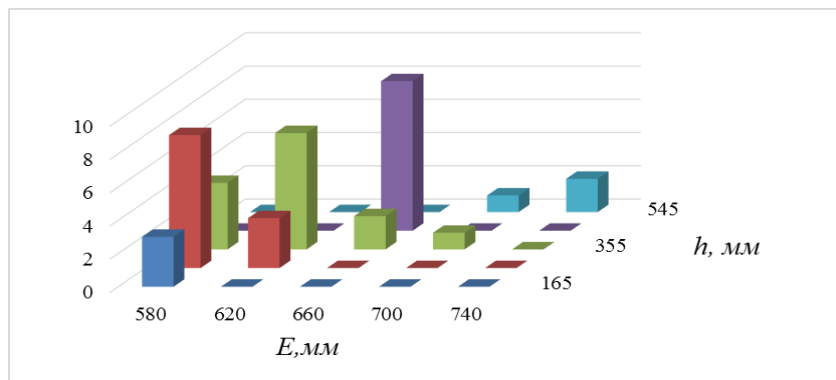
6)



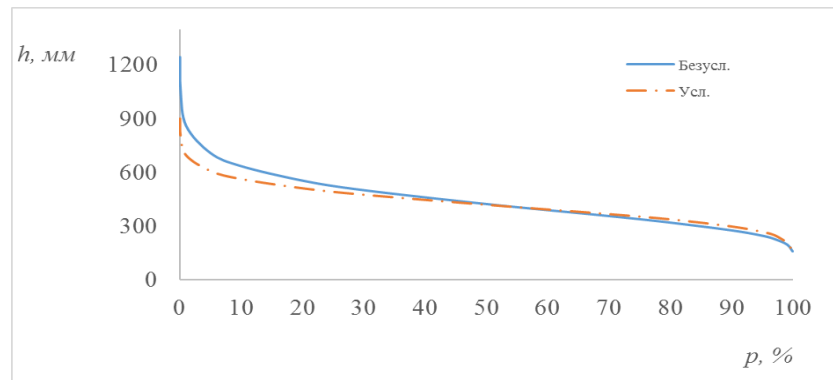
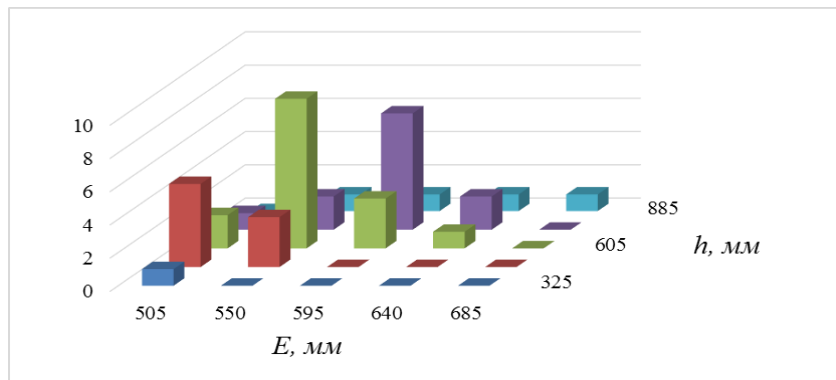
2)



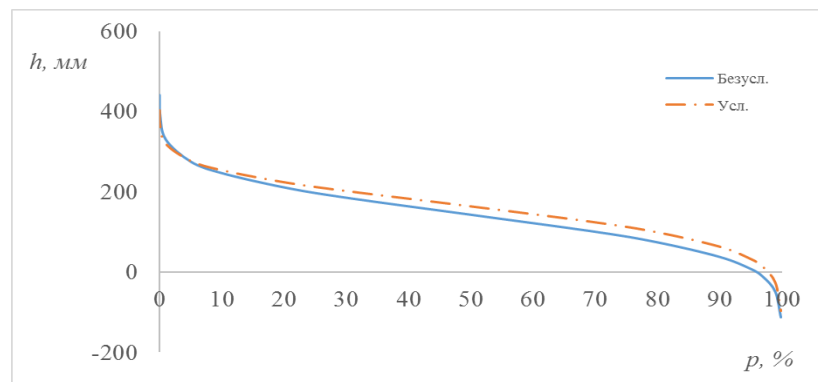
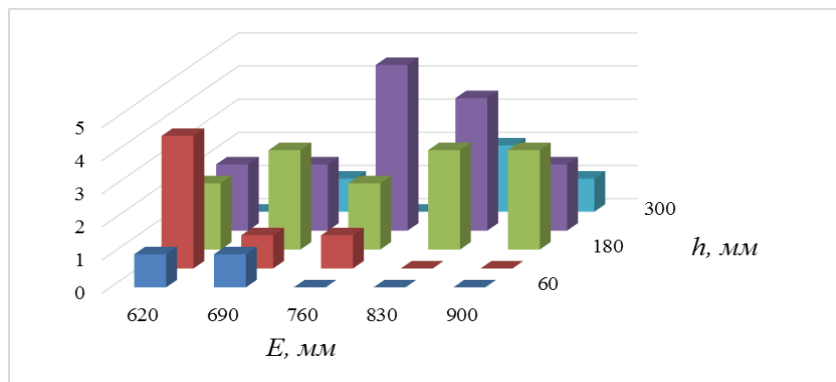
д)



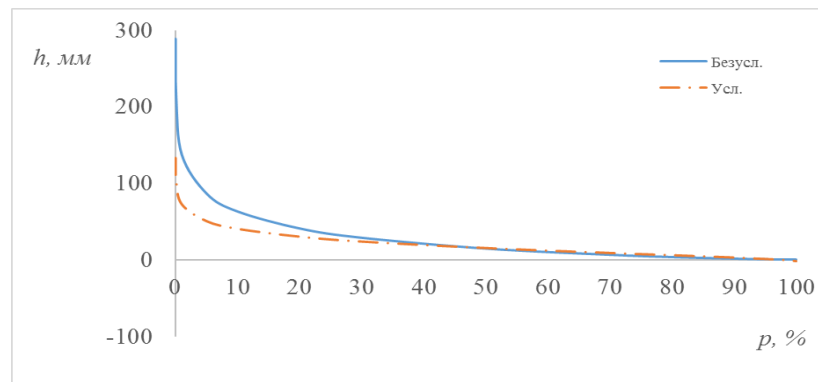
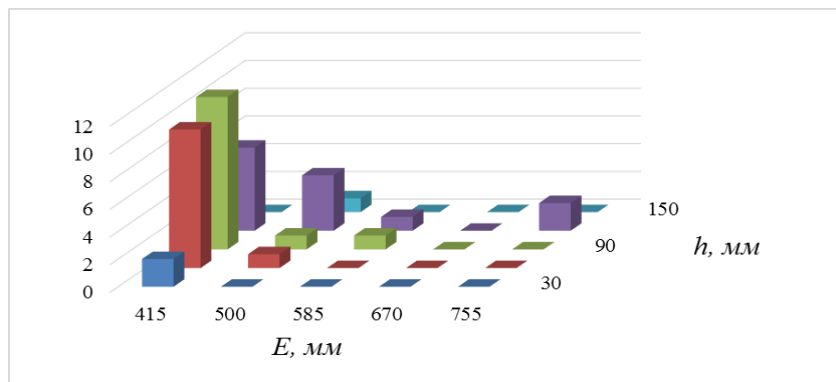
е)



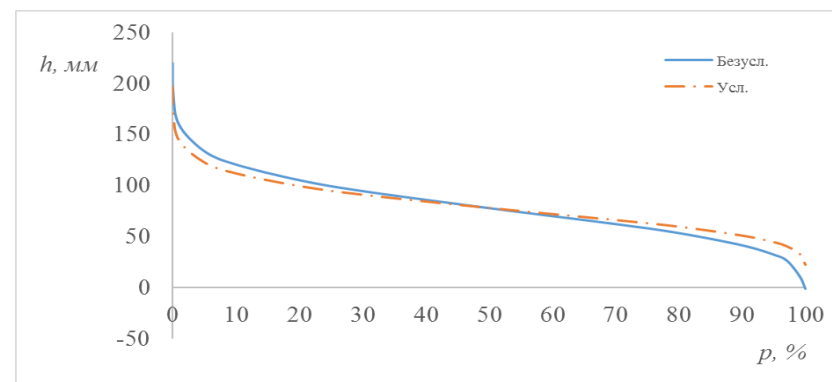
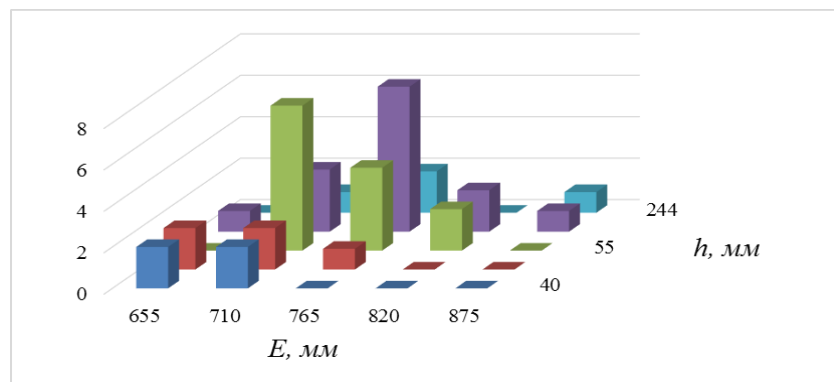
ё)



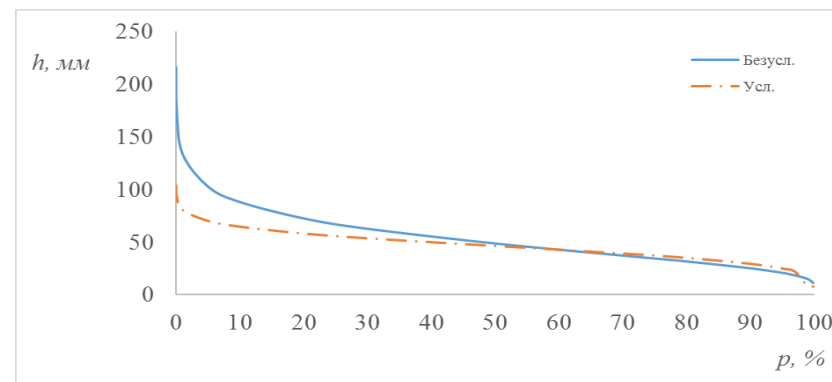
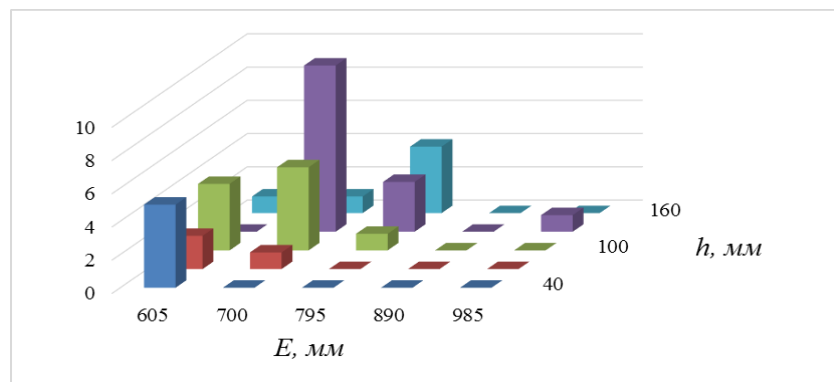
ж)



3)



u)



й)

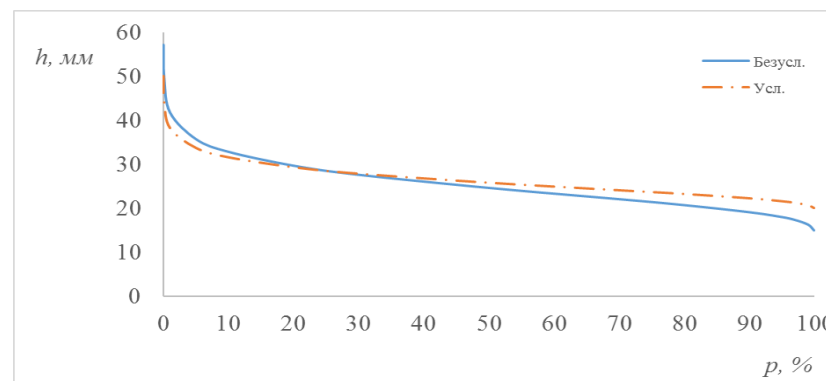
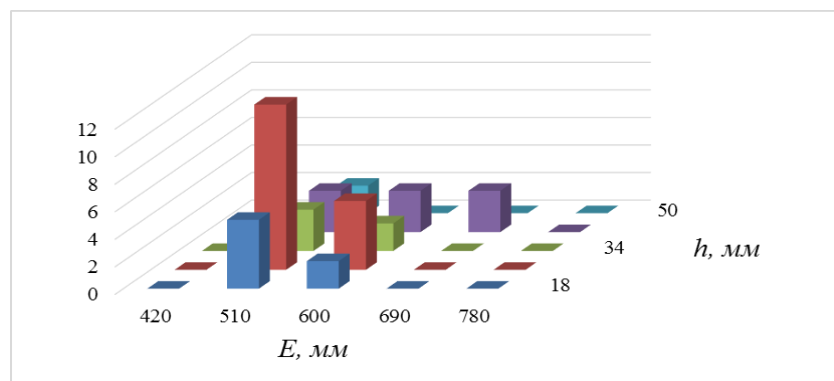


Рисунок Б.1 – Двумерные гистограммы, условные и безусловные кривые обеспеченности Пирсона 3-го типа: *а* – р. Mono, ст. Athieme, *б* – р. Bree, ст. Ceres toeken geb, *в* – р. Doring, ст. Elands drift – aspoort, *г* – р. Groot-vis, ст. Brandt legte piggot's bridge, *д* – р. Mtamvuna, ст. Gundrift, *е* – р. Mzimkulu, ст. Fp 1609030 the banks, *ё* – р. Slangrivier, ст. Vlakdrift, *ж* – р. Megalies, ст. Scheerpoort, *з* – р. Incomati, ст. Hooggenoeg, *и* – р. Chari, ст. Ndjamen (fort lamy), *й* – р. Okavango / cubango, ст. Mohembo/mtaembo.