



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 **Оценка избытка и дефицита
водных ресурсов Африки**

Исполнитель Бурагнонету Эна Гавели
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К.Т.Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

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

Коваленко Виктор Васильевич
(фамилия, имя, отчество)

«08» июня 2016г.

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 **Оценка избытка и дефицита
водных ресурсов Африки**

Исполнитель _____
Бурагнонету Эна Гавели
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель _____
К.Т.Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

д.т.н., профессор
(ученая степень, ученое звание)
Коваленко Виктор Васильевич
(фамилия, имя, отчество)

«__» июня 20__ г.

Санкт–Петербург
2016

Содержание

	стр.
Введение	4
1 Физико-географическое описание Африки	4
1.1 Положение	4
1.2 Рельеф	18
1.3 Климат	20
1.3.1 Температура	24
1.3.2 Осадки	24
1.3.2.1 Распределение осадков по территории	26
1.3.2.2 Годовой ход осадков	26
1.3.3 Сток	27
1.3.3.1 Средний многолетний сток и его распределение по территории	27
1.3.4 Испарение	28
1.3.5 Испаряемость	31
1.4 Речной сток	33
1.4.1 Основные характеристики стока	34
1.4.2 Формирование стока рек	35
1.4.3 Влияние климатических факторов на сток	38
1.4.4 Влияние почвы на сток	44
1.4.5 Влияние геологического строения речного бассейна на сток....	46
1.4.6 Влияние растительности на речной сток.....	48
1.4.7 Влияние озаренности на годовой сток рек.....	52
1.4.8 Влияние хозяйственной деятельности на сток.....	54
1.4.9 Понятие о норме стока.....	57

1.4.10 Карта стока.....	59
1.4.11 Колебания годового стока рек и его распределение в году...	61
2 Исходные данные	64
2.1 Карты мирового водного баланса	65
2.2 Ряды наблюдений за осадками и температурой	68
2.3 Расчет испарения и испаряемости, дефицита и избытка водных ресурсов рек	70
3 Математический аппарат.....	79
3.1 Статистические параметры.....	79
3.2 Оценка рядов на однородность.....	80
3.2.1 Критерий Стьюдента.....	80
3.2.1.1 Случай независимых выборок.....	81
3.2.1.2 Случай связанных (парных) выборок.....	82
3.2.1.3 Непараметрические критерии.....	83
3.2.2 Критерий Фешера.....	84
3.2.3 Числовые характеристики случайных величин, их роль и назначение	85
3.2.4. Моменты. Дисперсия. Среднее квадратичное отклонение	
3.3.1 Характеристики положения (математическое ожидание, мода, медиана)	86
3.3.2 Моменты. Дисперсия. Среднее квадратичное отклонение	95
Выводы	105
Литература	106

Введение

Актуальность оценки водных ресурсов Африки трудно переоценить. Большая часть континента испытывает острый недостаток в воде вследствие несоответствия ее водных ресурсов тепловым.

Водообеспеченность в работе принимается как соотношение поверхностного стока (Y) и дефицита влаги ($D_v = E_o - E$ разности испаряемости и испарения), характеризующее потребность в воде для оптимального сельскохозяйственного производства и количество имеющейся воды, которая может быть использована для этой цели.

Создана гидрометеорологическая база многолетних данных

- приземной температуры воздуха,
- осадков,
- речного стока,
- испарения (рассчитана),
- испаряемости (рассчитана).

Цель работы – оценить текущее состояние водных ресурсов Африки и уточнить регионы с их избытком ($Y > D_v$) и недостатком ($Y < D_v$).

1. Физико-географическое описание Африки

1.1. Положение и общая характеристика

Африка расположена на Юге Европы, между Средиземным морем на Севере, Атлантическим океаном на Западе и на Юго-западе, Индийским океаном на юго-востоке и на Востоке, Красным морем и Суэцком перешейке на Северо-востоке. Она простирается между $37^{\circ} 21'$ широты Север (Белая Кепка, Тунис), $34^{\circ} 50'$

широты Юг (Капка де Айгуиллс, Южная Африка), 17 ° 32 "долготы Запад (Зеленая Капка, Сенегал) и 51°25" долготы Запад (Капка Харун, Сомали). С севера к югу, С белого Кепки к Капке де Айгуиллс, она имеет 8060 км; это в счете 7430 с запада к востоку, Зеленой капки к капке Guardafui (очень поблизости капке Harun).

Её поверхность - это примерно 30 миллионов км ² (более точно, 29.820.000 км ²), путем включения Мадагаскара и других Африканских островов, которые имеют значение для приблизительно 625 000 км ². Она (это) таким образом учетверена такового Австралии, тройная из такового Европы; Африка, с другой стороны, имеет только пять, восьмой области Азии. Она часть прежнего старый континента и связана с этим Суэцким перешейком, который соединяет (связывает) её в Азии. Начиная с 1869, она символически отделена из Азии Каналом Суэца, но с геологической точки зрения Аравийский полуостров - это Африканец.



Рисунок 1. Карта Африки: растительного покрова и рельеф

Африка не имеет никакой реальной полуостров и заливы никогда не снижаются глубоко в страны. Чтобы это найдено, к центру, указывает расположенный в 1800 км наиболее подвинутого поближе моря. Она имеет только один километр побережья для 1100 квадратных километров, тогда как Европа имеет одному из этого для менее чем 300 км², Северной Америки, один для 400 км² и Южной Америки одной для 700 км². Эта массивная форма Африки обычна для неё с двумя другими Южными континентами, Южной Америкой и Австралией. В то время как Африка имеет небольшое количество побережья и глубоких заливов, острова редки и небольшие важный, за исключением Мадагаскара, который отличается столь же глубоко от всех остальных, как

необходимо видеть континент в миниатюре скорее чем зависимости Африки. Она более шире на Севере и проходит мимо сужения на юг.

Её структура - это даже больший постоянный клиент; пересеченный в середине экватором, она включенная в течение трех четвертей в межтропической зоне. Средняя высота являющаяся большой главным образом в части (сторона), расположенной на Юге от экватора климат, представляет это меньшее количество разнообразия чем в большей части других континентов.

Эруптивных камни проводят сильную небольшую комнату в Африке, кроме в вулканическом горном массиве Камеруна и вдоль Большой долины Трещины, то есть почти полностью вулканического происхождения на Эфиопском подносе в горном массиве, имеют повышение самостоятельно Вулкан Кения и Килиманжаро. Что касается примитивных камней, они выравнивают Эфиопский поднос между Нилом и побережьем Красного моря и окажутся в Тибести (Сахара), в Фута-Джалон, Адамуа и Сокото, на сторонах Гвинеи и юго-западной Африки, наконец в области Великих озер, между Ладо и Замбези.

Основания перехода встречаются на Северо-западе от Сахары, на гранях Сенегала, на Юго-западном побережье Южной Африки, почти всегда в границе примитивных слоёв. Вторичные основания составляют части Алжирца Сахары, Ливии, и Суданских, как и высоких подносов Южной Африки и части Атласа, из которого другая часть третична, настолько также поднос Барка. Основания четверки занимают узкий граничат с банками и дельтами Нила, Нигера и Замбези, почти целой Западной Сахары, страны увлажнились Голубым Нилом, в среднем течении Бассейна Конго и верхнего водоема Замбези.



Рисунок 2. Пейзаж долины Рифта в Кении

Африканский рельеф – монотонный, где форма подноса преобладает так что Африка имеет для среднего возвышения стран высоту, превосходящую таковому целого Азия (580 - 660 m).

Южная часть Африки составляет огромный поднос треугольного достижения формы, настигающий 1000 м; очень характеризующиеся и непрерывные горные цепи на Востоке и на Юге; террасы, прерванные на Западе, делают внешние банки, которые позволяют пригодный между морем и ими очень узкой прибрежной равнине. Долины Нила и Конго, который обучают реальную относительную депрессию через Африку, отмечают разделение Южного подноса от подносов Севера от континента.

Последний, меньшей высоты, чем южный поднос (плато), обучают (форма) несколько различных групп: на Западе от Нила, подносы Kordofan, Dar Fertit, Дарфура, и Ouadaï, происходя с Юго-востока к Северо-западу Tibesti и Hoggar; -

между Конго, депрессия Чада и Нигерских, высоких стран Adamaoua и Камеруна; - на Западе и на Юге от Нигера, группы, параллельной Атлантическому побережью, подносы типа Tagant и Adrar.

На Севере от Западной Африки, вне высокой Сахары в среднем 400 м. только, составляет себя громадная система Атласа, направленного С запада к востоку, как горы Европы, на которую это следует. Оттуда горная местность Магриба, который соответствуют, к востоку от Sirte, маленький поднос tripolitaïn Barka. Такой- вертикальная конфигурация Африки. Есть также действующие вулканы Virunga и в Эфиопии).

Принадлежа положением зоне тропических дождей в центре, в зонах торговых ветров и зимних дождей на Севере и на Юге от тропиков, Африканский континент, в результате модификаций, следующих влияния высоты, соседство моря, и т.д, обладает несколькими различными climateric областями . На Севере и на Юге от Экваториальной Африки, где дожди падают весь год, - две части страны муссонов более или менее сухой зимой (Sahel, Замбези), при том которого следуют за двумя зонами субтропических степей или пустынь на крайний климат (Сахара, Kalahari), вне которого прибывают две умеренных зоны субтропических зимних дождей, которые являются Средиземноморской областью на Севере, и таковом Курса на Юге.



Рисунок 3. Килиманджаро (5895 м), достигают максимума Африки (Танзания).

Гидрография. Из рельефа основания и климата вычитает легко гидрографии. Характерная линия особенность из Африканского гидрографии - это (где есть реки) отсутствие судоходных рек до их рта. Суды в Магрибе, на восточном побережье, и около Мыса Доброй-Надежды, где горы очень приди. поближе к морю, бесполезный в Сахаре и в южных степях, Африканские потоки большой важности редки. Только Нил зависящий от Средиземного моря, Нигера и Демократического Конго, которые бросаются в Атлантический океан, Замбези, которая преуспевает в Индийском океане, - такой; но ни один из этих рек не доступный уверенный больших длин в навигации. Они - все реки подноса, снижение в их верхнем курсе, и также в их средней стоимости, препятствиями: падения ,экспрессы, потоки, который останавливают навигацию, рассматривающий не только в конце прибрежных террас, но и более вверх все

еще. Вторичные потоки (Лимпопо, Апельсин) освобождены от трудностей этого вида - это привилегия некоторых менее важных рек как Шари, Куилу, Бенуэ, кто являются реальными водными путями к Африканскому центру.

Таблица 1. Длина главных рек Африки (км)

Река	Длина
Нил	6700
Конго	4374
Нигер	4200
Замбези	2660
Оранже	1860
Касай	1940
Сенегал	1700
Кубанго/Окаванго	1700
Волта	1600
Лимпопо	1600
Руфижи	1600
Убанги	1160
Шари	1200
Куанза	1200
Бенуэ	1360
Гамби	1127
Огоуэ	850
Ширэ	850
Салум	350
Габон (эстуэр)	250
Уэд эл-Кебир	>200

Все атмосферное осадение, которые падают основывая Экваториальной Африки, не обходит в море четырьмя огромными посланниками рек бассейнов, которые являются Озером Виктория, Альбано-Курд, Альбертом, Танганьикой, Бангуэло, Ньясса; одна часть из них накапливает внутренние подносы в огромных водоемах без потока (Озеро Чад, озеро Родолф или Низкий Нарок) закрывающего по крайней мере поверхность семь с половиной миллиона квадратных километров, в болотах с наклоном нерешенный как таковые озера Nô (Нил), или все еще Dilolo, воды которого льются иногда в Конго, иногда в Замбези.

Гидрографический режим Африки – это таким образом очень далеко не облегчает доступ в пределах континента.



Рисунок 4. Река Уга, высушенная большая часть время и круглый горный массив Brandberg в Намибии, замеченной начиная с мест из него.

Прибрежные районы и острова

Береговая линия предоставляет себя этому больше (побережье не предоставляет себя этому преимуществу); нигде он настоятельно воздействовал внутренними морями, даже не около Средиземного моря и около Красного моря; нигде мы можем указывать реальные заливы, не дальнейший север Syrtes, где на Западе около морской поверхности ненадлежащим образом назвал (упомянутый) Гвинейский залив. Никакое проектирование не снижается глубоко в море: ни в Кепке Бон в Средиземном море, ни в Атлантическом океане, Зеленом капке, капка Лопеза не Сокращает, или даже в Южной оконечности континента, капка Доброй Надежды; единственный делает исключение капкой Гвардафуй, в Индийском океане, не один в качестве окончания массивного углового Африканского Рога.

Что касается островов, очень редких на побережьях Африки, они, в Южном Атлантическом океане, только утесы, потеряны в океанских одиночествах, редкие острова; - маленьких архипелагов, немного более многочисленный в северной части; и все еще необходимо обратить внимание, чтобы эти острова, изолированные большими глубинами, не связаны ни в каком случае в Африке, не больше, чем в Индийском океане Мадагаскар, Маскаренские острова (Воссоединение, Морис) и Сейшельские острова. Только маленькие прибрежные потоки (Занзибар, Pemba) и Сокотора, кто объявляет на открытом море капки Guardafui, - действительно Африканские острова.

Флора и фауна.

Вообще говоря, мы можем устанавливать для распределения ботанической разновидности в Африке, три больших разногласия: пустыни, большие подносы, большие в больших устьях западной области. Область Средиземноморья должна войти в Приблизительно-европейца флору, с которой это имеет отношение абсолютно, овощ формируется являющийся в Алжире более или менее то же самое на юге Испании и побережья Средиземного моря. область пустыни

особенно богата имел большие травы с рассмотрением корней, в членах Euphorbiacée, в кактусах, zygophyllées, résédacées, asclépiades; деревья всегда принадлежат семейству ован, деревья саранчи с твердой древесиной, чахлый, закрытый шипами. Среди деревьев пальм, главные вещи - это дерево пальм, рониз, дум. В западной области существует баоба. Флора больших подносов очень богата в больших травах, это musacées, в деревьях любых размеров, в больших папоротниках группы cyathes, в деревьях пальм, в панда рожденный, dracoena, и т.д. Лесы снабжают всю твердую древесину, оцененную (уважаемый) в cabinetmaking (cabinetwork), как черное дерево. Мангры растут в устьях рек, даже на побережье Джибути, где вклад судов выжженную реки только случайно. Наиболее сингулярный и наиболее замечательный завод южной Африки - это mirabilis Welwitschia; наиболее полезный - дерево кофе, которое является уроженцем Эфиопией (в прежнем королевстве Каффа, который дал ему его название). Оттуда что Арабские люди из Харара транспортировал его в Аравии.

После предвзятых идей, фауна Африки (за исключением Мадагаскара, чья фауна является особенным и связана с Индией и Ост-Индией), хотя чрезвычайно различный, не содержит очень большую новизну, те же виды обнаружение себя более или менее во все его область. На 174 семей позвоночных, он владеет только 22 своих собственных; 140 видов млекопитающих, 90 являются особенными для него; для птиц, она имеет 179 конкретных видов 294. Рыбы живущие в пресной воде Африки - многие очень в наличных деньгах, но трех семействах только специфические ему: mormyridés, gymnarchidés, polyptéridés.



Рисунок 5. Бабуины в Южной Африке

Географические подразделения такие же, как для фауна природы флора:

Фауна больших лотков

Фауна больших подносов чрезвычайно богата; она дает представление о том, что Европа в третичном периоде. Огромные стада антилоп, зебр, жвачных животных, в том числе самый мощный в буйвола бродят луга с страусов, жирафов, слонов, носорогов. Бегемот, исключительно африканской форме, живет во всех реках и озерах с ламантином, Травоядные также уникальный для этой дикой природы. Крупные хищники лев, леопард, пантера; дикие собаки или "нарисованный волк" живет в полосах в больших равнинах, которые граничат мыс. Гиены, шакалы, виверровые основные средние плотоядные; они

распространились в регионе пустыни, где живет в песчаных дюн, любопытных Фенек.

Африка – второй по величине после Евразии материк Земли и самый крупный из южных материков. Название Африка происходит от топонима афры, афарики, авриги. Первоначально единого названия для материка не существовала. Территории к западу от Египта до Атласа в древности называли Ливия, а к югу от Ливии – Эфиопия.

Территории к западу от Египта до Атласа в древности называли Ливия, а к югу от Ливии – Эфиопия. Вместе с островами площадь этого материка 30,3 млн. кв. км. Крайние точки материка на севере – мыс Эль-Абьяд (Рас-Энгела, Бен-Секка) (37 град. 21 мин. с. ш.), на юге – мыс Игольный (34 град. 52 мин. ю. ш.).

Экватор пересекает Африку по центру. Континент расположен в северном и южном полушариях. Начальный меридиан пересекает Африку на западе, и большая её часть лежит в восточном, а меньшая – в западном полушариях.

Африка является огромным континентом. Площадь континента составляет 30 000 000 км². Он имеет треугольную форму. Африка простирается с севера на юг на 8000 км и Запада на Восток на 7500 км. Она граничит на севере Средиземноморья на северо-запад на берегу Красного моря, на западе Атлантического океана.

Африка делится на два полушария по экватору. Она соединяется с Азией Суэцкий перешеек. Она подошла ближе к Европе Гибралтарского пролива. Однако Африка уже давно игнорируется европейцами из-за его негостеприимных берегов, пустыня Сахара и большой экваториальный лес. Африканский ландшафт относительно прост, он состоит в основном из лотков. Что касается его климата, оно определяется пересечением экватора и тропиков и Африка является самым горячим континентом.

Большое разнообразие теплого климата, которые подходят различные типы растительных ландшафтов и различных типов потоков встречаются там. Африка

является континентом под заселена. Этот подпункт урегулирования связано с работоторговлей, болезни, недоедание, войны. Тем не менее, Африка является колыбелью человечества. Это популяция белого и черного. Экономика Африканских слаб из-за работоторговли и колониальной эксплуатации. Эта экономика основана на сельском хозяйстве и животноводстве, а также прикладного искусства.

Африка может быть разделена на семь основных областей.

1. Северная Африка Магриб, Атлас область,
2. Сахара (регион Сахары): самая большая горячая пустыня в мире с площадью от 8 до 9 млн.км²,
3. Сахель (Сахель): полупустыня географической полосе к югу от Сахары площадью от 2 до 3 млн км².
4. Судан (Дарфур), "Блед-эс-Суден" (страна неграм), Западная Африка, не следует путать с состоянием Судана. Это зона саванн, расположенный к югу от Сахеля.
5. Африканский Рог вокруг Эфиопии характеризуется очень высоких обводненных и плодородных плато, это пасторальная область. Вулканическая деятельность создала озера, тропическая и влажная экваториальная Африка,
6. Южная Африка
7. Мадагаскар, где географическая изоляция создала различные экосистемы континента.

Главной особенностью физико-географического положения Африки является то, что материк пересекается экватором в центральной части и, следовательно, симметричен относительно него. С севера на юг Африка протягивается на 72 градуса и 8000 км. Северный и южный тропики пересекают материк в краевых частях и около 4/5 территории Африки находится в жарком поясе освещённости, то есть территория хорошо освещена и следовательно прогрета Солнцем.

Материк располагается в семи климатических поясах (по Алисову): субтропическом, экваториальном, тропическом и субэкваториальном северного и южного полушария. Наиболее широкой части материка находится к северу от экватора между 10 и 16 град. с. ш. где Африка простирается от 17° 33' з. д (мыс Альмади) до 51 град. 23 мин. в. д. (мыс Рас-Хафун).

С запада на восток Африка протягивается почти на 69 град. и соответственно 7500 км. Африка единственный материк, располагающийся во всех четырёх полушариях.

Материк располагается в 4-х часовых поясах – с 0-го по 3-ий. Африка и Евразия фактически составляют единый массив суши восточного полушария, отделенной от других материков огромными пространствами океанов. Поэтому растительность и животный мир Северной Африки, Южной Европы и Юго-Западной Азии имеют много общих видов. Берега Африки омывают воды Индийского и Атлантического океанов и их морей – Средиземного и Красного. Островов у берегов Африки не много. Самый крупнейший из них – Мадагаскар.

Африка расположена очень близко от Евразии, на юго-западе от последней, и отделяется узким Суэцким перешейком, по которому проложен Суэцкий канал.

С севера Африка омывается Средиземным морем и отделена от Европы очень узким Гибралтарским проливом; с запада – Атлантическим океаном, который образует в Экваториальной части большой Гвинейский залив; с востока – водами Индийского океана и Красного моря. Береговая линия материка слабо изрезана.

Африка является самым жарким материком земли. Это связано с тем, что, располагаясь по обе стороны от экватора, она пересекается им практически посередине. При этом значительная её часть находится между тропиками. Такое расположение на планете привело к тому, что материк получает очень большое количество солнечного тепла. Африка занимает площадь 30,3 млн км².

Протяженность с севера на юг – 8 тыс. км, с запада на восток в северной части – 7,5 тыс.

1.2. Рельеф

Строение поверхности материка довольно своеобразно. Рельеф Африки – обширные равнины сменяющийся высокими горами и бескрайними пустынями. Преобладают равнины и плоскогорье высотой от 200 до 1000 м, низменностей очень мало.



Рисунок 6. Рельеф Северной и Центральной Африки.



Рисунок 7. Рельеф Южной Африки.

Наиболее обширные плоскогорья – Восточно-Африканское и Южно-Африканское. Приподнятые участки чередуются с котловинами, наиболее обширные из которых – котловина Калахари, впадина Конго и др.

Особенности рельефа связаны с историей развития материка. В основе континента лежит древняя Африкано-Аравийская платформа – часть расколовшейся Гондваны. Платформа сформировалась в архее и протерозое и за 2 – 3 миллиарда лет приобрела большую устойчивость. Только Атласские горы на севере и Капские на юге созданы более поздними движениями земной коры.

Огромная Африканская глыба испытывала поднятие и опускания, при этом северная часть материка чаще опускалась, нежели поднималась, заливалась

морями. Кристаллический фундамент платформы перекрыт осадочными породами и лишь в центре Сахары и на побережье Гвинейского залива выходит на поверхность.

Рельеф Восточной и Южной Африки формировался иначе – преобладали поднятие земной коры, образовывались гигантские разломы, горсты и грабены. Активно развивалась вулканическая деятельность. Здесь много лавовых равнин, грабены заняты озерами. Извержения вулканов, землетрясения происходят и в наши дни. В полосе рифтов расположены вулканы, в том числе высшая точка материка – вулкан Килиманджаро (5895 метров).

Недра Африки богаты минеральными ресурсами. Размещение месторождений тесно связано с геологической историей и тектоническим строением. Восточная и Южная (высокая) Африка, где на поверхности преобладают магматические породы, известна рудами черных и цветных, благородных и редких металлов. Месторождения алмазов приурочены к кимберлитовым вулканическим трубкам взрыва в недрах платформы. В толщах осадочных пород Северной и Западной Африке накопились запасы фосфоритов, нефти и природного газа (область Сахарской плиты), поваренной соли, каменного угля (Нигерия). Нефть и газ добывают не только на суше, но и на шельфе Атлантического океана. В Южной Африке значительны запасы каменного угля, медных, урановых руд.

1.3. Климат

Климат Африки определяется положением большей её части между тропиками и характеризуется высокими значениями суммарной солнечной радиации (180-200 ккал/см² в год). В соответствии с этим большая часть Африки имеет высокие температуры и считается самым жарким материком.

На северном побережье Гвинейского залива и во впадине Конго средние температуры в течение года 25-26°C. Средние летние температуры наиболее

высоки на севере Судана, в Сахаре (30-32°C; в западной части до 38°C); в Эль-Азии (Ливия) наблюдался максимум температуры на Земле 58°C. В субтропических широтах летом от 16 до 22 °C. Тёплые Мозамбикское и Игольного мыса течения, омывающие восточные берега Африки к югу от экватора, повышают и выравнивают температуры побережья; Канарское и Бенгельское холодные течения снижают температуры и усиливают засушливость западных берегов Африки в тропиках.

В Северном полушарии континентальность климата Африки очень велика из-за больших размеров суши и близости Азии. В Южном полушарии много осадков выпадает на наветренных склонах Драконовых гор и Мадагаскара. Основной циркуляционный процесс над Африкой — перенос тропического воздуха пассатами, оттекающими от поясов высокого давления в тропиках к экваториальной ложбине низкого атмосферного давления. Тропический воздух пассатов встречается с экваториальным в северных и южных зонах внутритропической конвергенции. В этих зонах часто возникают грозовые ливни, приносящие обильные осадки. Непосредственно в толще экваториального воздуха выпадают конвективные осадки.

В северо-восточной Африке от 5 ° ю. ш. вдоль низменного побережья полуострова Сомали дует юго-западный муссон, устремляющийся в Индию. Дожди выпадают только во внутренних горных районах полуострова. В Восточной Африке к югу от экватора также выпадает очень мало осадков, т. к. влажные ветры, поступающие с западной периферии Южно-Индийского океанического максимума, дуют в основном параллельно берегу и дают осадки лишь на наветренных склонах плоскогорья. В его внутренних районах сухо, т. к. в Сахарский минимум перетекает континентальный тропический воздух из Южно-Африканского максимума, устанавливающегося зимой в Южном полушарии над Южной Африкой в тропических широтах.

С юго-восточными ветрами этот воздух проникает и в субэкваториальные широты Южной Африки, где также осадков зимой не бывает. Вдоль западного побережья в тропиках дуют ветры с восточной периферии Южно-Атлантического максимума, пассатная инверсия лежит ещё ниже, чем у западных берегов тропической Африки. Вдоль восточной окраины Южной Африки зимой выпадают циклонические осадки на линии внутритропического фронта (на вершинах Драконовых гор бывают сильные снегопады).

По сезонным особенностям циркуляции атмосферы, хода температуры и выпадения осадков на побережье Гвинейского залива и во впадине Конго выделяется постоянно влажный и жаркий экваториальный тип климата (5-7 ° с. ш. до 2-3 ° ю. ш.). Здесь находится самое влажное место Африки — Дебунджа (у подножия г. Камерун, 9655 мм в год); в остальных районах выпадает не менее 1500 мм. К северу и к югу экваториальный климат постепенно переходит в субэкваториальным летним влажным и зимним сухим сезонам. Длительность последнего возрастает с 2 до 10 мес., а годовые суммы осадков уменьшаются с 1800 мм до 300 мм.

К северу от 20 ° с. ш. и к югу от 18 ° ю. ш. климат Африки тропический, в Северном полушарии пустынный, очень сухой. В Сахаре количество осадков уменьшается до 100 мм и менее в год; Восточная Сахара — самый сухой район Африки (10-20 мм осадков в год). Вдоль западного побережья климат океанический пустынный с высокой относительной влажностью воздуха.

В Южном полушарии в тропическом поясе три сектора: на западе — океанический пустынный, в центре — континентальный умеренно засушливый и засушливый, на востоке — морской пассатный с летним максимумом осадков. Северные и южные районы Африки лежат в субтропических климатических поясах.

На севере Африки климат средиземноморский, а в его внутренних районах и на побережье Ливии и ОАР — полупустынный и пустынный. В Южной Африке

типично средиземноморский климат наблюдается на юго-западных наветренных склонах Капских гор, муссонный субтропический с летним максимумом осадков — на юго-восточной окраине; во внутренних районах — полупустынный и пустынный. [1]

Климат сухой. Африка – самый жаркий материк планеты. На большей ее части средняя температура любого месяца выше $+20^{\circ}\text{C}$, что объясняется расположением большей части материка между тропиками, где солнце в течение года стоит высоко над горизонтом, а два раза в год бывает в зените. Сезоны года больше различаются между собой по условиям увлажнения.

Особенности климата Африки определяются циркуляцией воздушных масс, от которой во многом зависит количество осадков и режим их выпадения. Над экваториальной частью материка формируется пояс низкого давления, а в тропических широтах – пояса высокого давления. Эти пояса перемещаются вслед за генитальным положением солнца и обуславливают передвижение над материком экваториальных, тропических и умеренных воздушных масс.

Почти весь континент испытывает действие постоянных ветров – пассатов. Северо-восточные пассаты, приходящие с суши, почти не приносят влаги, а юго-восточные несут ее с Индийского океана.

В субтропических широтах в зимние месяцы осадки выпадают из умеренных воздушных масс, в которых господствует западный перенос воздуха с Атлантического океана.

На распределение осадков влияет рельеф, крутые и высокие берега континента затрудняют проникновение влажных ветров с океана в глубь материка. На наветренных склонах гор осадков выпадает больше. На Эфиопском нагорье, на склонах горы Камерун их количество достигает 10 000 мм в год. Самые сухие области расположены не только внутри материка, но и в его приокеанических частях. Так, западное побережье материка в тропических широтах омывается холодными течениями. Воздух над ними оказывается

холоднее, чем в верхних слоях, конвекция его затруднена. Кроме росы и туманов осадков здесь почти нет. На материке выделяют один экваториальный, два субэкваториального, два тропического пояса. Внутри некоторых из них существуют различия, определяющиеся количеством осадков и их режимом.

Африка располагается в трех климатических поясах: большая часть материка находится в тропических широтах, меньшая – в экваториальном поясе, северо-западная и юго-восточная окраины материка относятся к субтропическому поясу.

1.3.1 Температура

Карта среднегодовой температуры за период 1966 – 2014 гг. и карта изменений температуры от периода 1901 – 1965 к периоду 1966 – 2014 гг. построены по данным интернет-ресурса KNMI Climate Explorer (в 400-х узлах) по модели CRU TS3.23.

1.3.2 Осадки

В сети Африке есть более 5000 осадкомерных станциях. В настоящее время составляет, но размещена она по территории континента крайне неравномерно. Наибольшая плотность станций в южных странах, на северном побережье материка в пределах Алжира и Туниса, а также в экваториальных и приэкваториальных странах. В частности, в республике Того на территории 57 тыс. км² расположено более 80 дождемерных станций, или около 1 пункта на 600 км². В Южно-Африканской Республике, на площади 1,2 млн. существует весьма развитая сеть станций: более 2-3 тыс. пунктов.

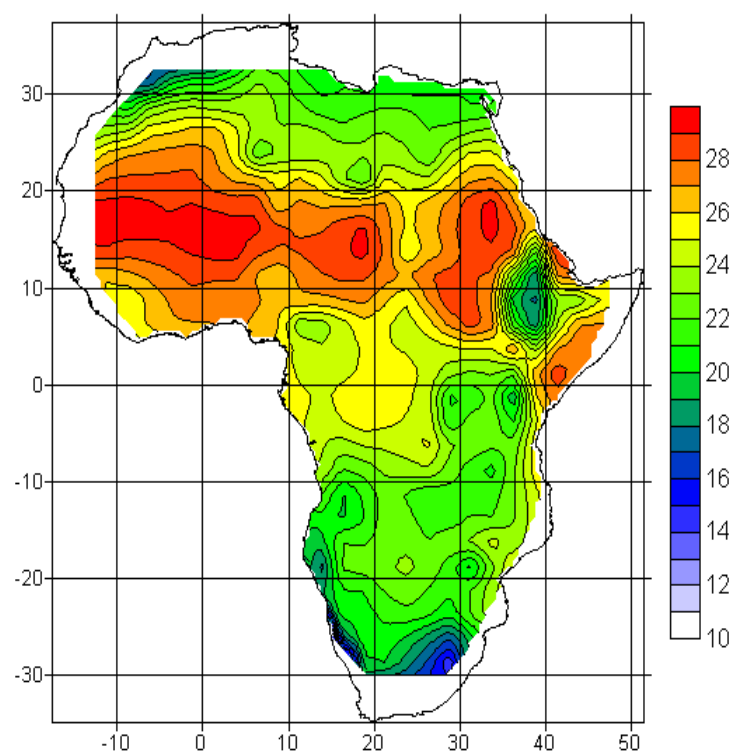


Рисунок 8. Карта среднегодовой температуры за период 1966 – 2014 гг.

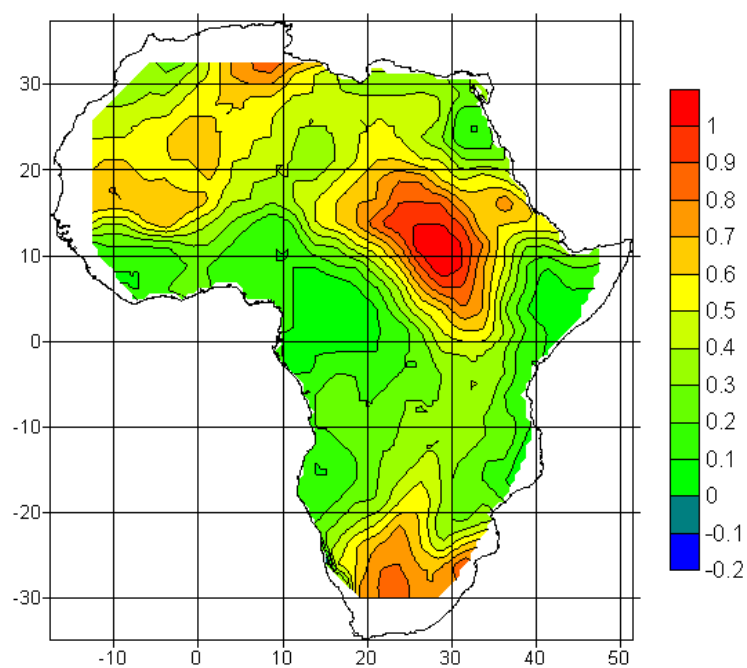


Рисунок 9. Карта изменений температуры от периода 1901 – 1965
к периоду 1966 – 2014 гг.

1.3.2.1 Распределение осадков по территории

В пределах африканского материка в среднем за год выпадает 725мм осадков. В наиболее сухом поясе (20-30° с. ш.), занимаемом в основном Сахарой, выпадает в среднем всего около 40мм, тогда как в экваториальном поясе Северной Африки сумма осадков составляет 1380мм, т.е. в 35раз больше. Самая засушливая часть Африки – восточная Сахара, где в среднем за год выпадает менее 10мм осадков, а местами всего 1-2мм (Ливийская пустыня). Сухо на юго-западе пустыни Калахари и на западном побережье южной Африки, где протянулась узкая полоса приморской пустыни Намибии; на полуострове Сомали, на побережье Аденского залива и в глубоко врезанных долинах Эфиопского нагорья (50-100мм осадков за год).

Области обильных дождей лежат в экваториальной зоне Африки: от 10° с.ш. до 10° ю.ш., где в среднем выпадает 1350мм осадков за год. На крайнем западе широтного пояса Северной Африки (0-10° с.ш.) за год осадки достигают в среднем 3400мм. На побережье Гвинейского залива находится самое влажное место Африки – Дебунджа (у подножия горы Камерун, 9950мм осадков превышает 4000мм).

1.3.2.2 Годовой ход осадков

В оба переходных сезона в Северной Африке выпадает почти одинаковое количество осадков. Исключение представляют крайние западные и восточные побережья. На Атлантическом побережье осенью выпадает в 3-4 раза больше осадков (30-40%, местами до 50%), чем весной (10%). На восточном побережье Красного моря, наоборот весенние осадки (30-40% годовой суммы) в 2 раза превышают осенние (20%). В экваториальной зоне (бассейн р. Конго) при сравнительно равномерном выпадении осадков выделение календарных сезонов носит условный характер. В бассейне р. Конго начало влажного периода в

августе, а к востоку от озера Виктория в марте, местами в апреле за это время выпадает около 40% годовой суммы.

В Южном полушарии влажный период приходится в основном на декабрь-февраль (выпадает 50-60% годовой суммы), на севере Атлантического побережья – на февраль – апрель, к югу от тропика – на январь – март (выпадает 50-60% годовой суммы). На юго-западном побережье материка влажный период приходится на май – июль в отличие от юго-восточного, где он сдвигается на август – октябрь.

1.3.3 Сток

Африка является малоизученным в гидрологическом отношении континентом. Общее количество гидрологических постов на 1965г, составляло 2033. В среднем один гидрологический пост приходится на 11тыс. т.е., на территорию, в 4 раза большую, чем в среднем для всей суши (одна станция на 2,65тыс. км² без учета Антарктики). Распределение гидрологических станций по территории крайне неравномерное. Пестрой гидрологической изученностью характеризуется западная Африка, включающая 15 различных по площади и экономическому развитию стран.

1.3.3.1 Средний многолетний сток и его распределение по территории

Для Африки характерна большая контрастность распределения среднего многолетнего стока по территории. Огромные пространства северной и южной частей континента заняты пустынями и полупустынями Сахара, Калахари, Намибия, где местами (Ливийская пустыня в восточной части Сахары) за год выпадает от 1 до 10мм осадков, в связи, с чем сток практически отсутствует. В то же время в экваториальной области осадки и сток достигают наибольших на континенте значений, превышающих 3000 – 4000мм. В целом для континента характерно уменьшение стока от экватора к тропикам: в северном полушарии примерно до

15° с.ш. (пустыня Сахара), в южном – до 20° ю.ш. (полупустыня Калахари), и увеличение его в субтропических областях. В пределах экваториальной области расположены реки побережья Гвинейского залива, центральная часть бассейна р. Конго, верхнее течение р. Нила и реки полуострова Сомали.

По количеству воды на душу населения ($\frac{\text{м}^3}{12000\text{год}}$) Африка характеризуется показателями, близкими к средним для мира ($\frac{\text{м}^3}{12900\text{год}}$). Тем не менее большая часть континента испытывает острый недостаток в воде вследствие несоответствия её водных ресурсов тепловым ресурсам. О фактической водообеспеченности можно судить по соотношению поверхностного стока Q_c и дефицита влаги $D_B = E_0 - E$ (соответственно максимально возможное и фактическое испарение), характеризующему потребность в воде для оптимального сельскохозяйственного производства и количество имеющейся воды, которая может быть использована для этой цели. Положительные значения разности $Q_c - D_B$ свидетельствуют о достаточных водных ресурсах, отрицательные – о их недостатке даже при условии максимального регулирования речного стока.

Недостаток водных ресурсов в Африке достигает 1144мм, или почти 34тыч. в год. По сравнению с Индийским склоном несколько лучше водообеспечен Атлантический, в пределах которого выделяются крупные районы постоянно избыточного увлажнения общей площадью около 10% площади континента (побережье Гвинейского залива в Западной Африке большая часть бассейна р. Конго). В целом достаточными водными ресурсами характеризуется о. Мадагаскар ($Q_c - D_B = 29\text{мм, или } 17\text{км}^3$).

1.3.3 Испарение

Расчет испарение, производился без учета потерь воды из русел рек. Чрезвычайное разнообразие условий увлажнения континента является причиной того, что испарение на рассматриваемой территории изменяется от нескольких миллиметров в некоторых районах Сахары и пустыни Намибии до 1300мм в год в средней части бассейна р. Конго.

В субтропическом поясе, охватывающем северо-западное побережье Африки и южную оконечность материка, годовые величины испарения, зависимости от количества выпадающих осадков, изменяются от 200-600мм в северном полушарии до 300-800мм в южном. При этом испарение убывает от побережий в глубь континента. Диапазон изменения годовых величин испарения в зоне тропического воздуха превышает 1000мм. В зоне тропического северного полушария (Сахара, северное побережье полуострова Сомали), в силу большой сухости климата, испарение невелико и практически равно осадком. На большей части территории испаряется менее 100мм влаги в год, а в некоторых районах испарение близко к нулю.

Зона тропического воздуха южного полушария отличается большим диапазоном изменения испарения – от близких к нулю величин на западном побережье Африки в пустыне Намибии до 1000-1100мм в год в нижнем течении р. Конго и на юго-восточном побережье Индийского океана, а также на восточном побережье острова Мадагаскар (климат западной периферии океанических антициклонов). В Индийской области в связи с быстрым убыванием увлажненности от берега в глубь континента испарение от восточного побережья на запад уменьшается достаточно интенсивно. Однако в связи с меньшей континентальностью климата зоны тропического воздуха южного полушария по сравнению с одноименной зоной северного полушария величины испарения в континентальной области рассматриваемой зоны южного полушария не опускаются ниже 100мм/мес.

В зоне экваториальных муссонов, так же как и в рассмотренных выше зонах, испарение существенно отличается в разных районах в связи с большим разнообразием географических условий и характера увлажнения. Годовые суммы испарения возрастают с увеличением мощности летнего муссона от 100мм в северном полушарии на границе с тропической зоной до 1000-1100мм в бассейне р. Конго. В муссонной зоне южного полушария испаряется 400-500мм влаги в год на северо-востоке территории вблизи экватора и 1000мм в бассейне р. Конго.

В западной части Эфиопского плоскогорья испарение значительно 600-800мм в год. К востоку в связи с небольшой вертикальной мощностью юго-западного муссона осадки и соответственно испарение быстро уменьшаются, и на севере полуострова Сомали испаряется менее 100мм, т.е. практически все выпадающие осадки. К югу испарение возрастает вместе с увеличением осадков, и на юге полуострова Сомали вблизи экватора испарение составляет около 400мм влаги в год.

В континентальной области муссонной зоны южного полушария испарение уменьшается с севера на юг вместе с убыванием осадков от 1100мм в верхнем течении р. Конго до 500мм на юге зоны. Вследствие большей увлажненности климата по сравнению с одноименной зоной северного полушария испарение в этой области выше, чем в северном полушарии. В Индийской области в соответствии с распределением осадков испарение возрастает от 400-500мм (юг полуострова Сомали) до 1000мм (юго-восточное побережье).

В экваториальной зоне испарение изменяется также в достаточно широком диапазоне. На побережье Гвинейского залива наибольшее испарение наблюдается на северо-западе и составляет 1000-1100мм влаги в год.

На северном низменном побережье испарение существенно меньше в связи с уменьшением осадков вследствие того, что воздушные потоки направлены вдоль береговой линии. В нижнем течении р. Вольты выделяется область с испарением менее 800мм. На побережье Камерун испарение приближается к

своему верхнему пределу испаряемости. Величины испарения невелики (800-900мм) вследствие повышенной облачности, осадков, влажности воздуха, снижающих радиационный баланс. В силу тех же причин понижено, по сравнению с восточными районами, испарение на западном побережье Гвинейского залива, где его годовые суммы составляют 900-1000мм. К востоку испарение увеличивается. На большей части бассейна р. Конго испарение превышает 1000мм, а в северной части бассейна отмечается замкнутая область с увеличением испарения более 1250мм.

Поскольку основная часть территории Африки расположена в тропических широтах, характеризующихся большими величинами радиационного баланса в течение всего года, внутригодовое распределение испарения в основном определяется количеством выпадающих осадков и их годовым ходом.

Исключение представляет субтропическая зона, где имеющиеся запасы влаги зимой в ряде районов не могут в полной мере реализовать на испарение вследствие недостаточности в это время года тепловых ресурсов (малости радиационного баланса и испаряемости).

1.3.4 Испаряемость

Африка является единственным континентом, большая часть которого расположена в тропических широтах. Вследствие этого поверхность континента получает большое количество солнечного тепла, и величины радиационного баланса в среднем составляют около $70 \text{ ккал/}(\text{см}^2 \cdot \text{год})$. При таких ресурсах энергии возможности для испарения влаги с поверхности континента очень велики.

Расчеты потенциально возможного испарения показали, что испаряемость в Африке может превосходить 2500мм влаги в год. Наибольшие величины испаряемости в Африке отмечаются в зонах тропического воздуха. По сравнению с континентальными областями, западные побережья зон тропического воздуха

характеризуются меньшими величинами испаряемости, вследствие повышенной влажности воздуха, пониженной температуры и радиационного баланса.

К экватору испаряемость уменьшается вследствие увеличения увлажнения климата и роста облачности, понижающих энергетические возможности испарения и, следовательно, испаряемость. Самые низкие величины испаряемости в экваториальной зоне и зоне экваториальных муссонов отмечаются на побережье Гвинейского залива, где они немногим превышают 1000мм. В бассейне р. Конго испаряемость составляет 1300-1500мм в год. Большая испаряемость также на Абиссинском нагорье – около 1500 – 1700мм на периферии и 1300мм в год в центре. Расчеты показали, что испаряемость уменьшается с увеличением высоты места с градиентом 10-30мм/год на 100м поднятия.

От тропического к субтропическим зонам потенциальные возможности испарения понижаются, в основном вследствие уменьшения радиационного баланса с увеличением широты места. На северо-западном и южном побережьях материка испаряемость составляет около 1200мм.

Для экваториальной зон, охватывающей побережье Гвинейского залива и среднюю часть бассейна р. Конго, характерен слабо выраженный годовой ход испаряемости с некоторым увеличением весной и осенью. Амплитуда годового хода изменяется в пределах 5% годовой величины. Месячные величины испаряемости составляют около 10% годового значения.

В зоне экваториальных муссонов, охватывающей значительную площадь в северном и южном полушариях, амплитуда годового хода испаряемости также невелика – менее 10% . в годовом ходе отмечается два минимума – зимний и летний, связанные с понижением радиационного баланса и увеличением влажности воздуха в период муссона. Наибольшая испаряемость наблюдается весной и достигает 10-13% годовой величины (Могадишо, Зомба). В южном полушарии осеннее повышение испаряемости, как правило, выражено слабо и

период пониженной испаряемости продолжается со второй половины лета до весны (Зомба).

В зонах тропического и субтропического воздуха кривая годового хода испаряемости имеет летний максимум и зимний минимум. Величины максимума в континентальных областях зон тропического воздуха составляют 12 – 13%, амплитуда годового хода достигает 8 – 10% годового значения (Марса – Матрух, Тесалит, Виндхук). На Атлантическом побережье тропических зон обоих полушарий амплитуды годового хода испаряемости в два раза меньше, чем в континентальных областях. Максимальные месячные величины испарения составляют около 10% годовой.

Субтропическая зона характеризуется более значительным изменением испаряемости в течение года – амплитуды годового хода превосходят 10% годового значения, максимальные месячные величины достигают 15% её годовой величины (Марракеш, Порт – Элизабет).

В Экваториальной зоне максимально возможное испарение полностью обеспечивается радиационным балансом. В зоне тропического воздуха, кроме западных побережий континента, на испарение увлажненной поверхности помимо радиационного баланса затрачивается тепло турбулентного потока из воздуха в размере 20 – 40% величины радиационного баланса.

1.4 Речной сток

Водные ресурсы

Водные ресурсы Африки используются главным образом для орошения земель, водоснабжения городов, промышленных нужд. В условиях засушливого климата материка исключительно важное значение для развития сельского хозяйства имеет орошение. Около 3000 лет до н.э. была создана система орошения по берегам Нила. До нашей эры существовало орошение в северной части Африки в оазисах Туниса и Алжира. В настоящее время используются колодцы,

созданные 2000 лет назад в северной Ливии. Общая площадь орошаемых земель составляет 9,0 млн. га, что составляет 2% площади материка.

1.4.1 Основные характеристики стока

Для количественной оценки стока рек применяются следующие его характеристики.

Объем стока ($W \cdot \text{м}^3$) или (км^3) - количество воды, протекающее в русле реки через данный замыкающий створ за промежуток времени T суток,

где Q - средний расход в ($\text{м}^3/\text{с}$) за время T суток; 86400 - число секунд в сутках.

Модуль стока M л/(с* км^2) - количество воды, стекающей с единицы площади в единицу времени,

$$M = 10^3 \frac{Q}{F} \quad (1.4.2)$$

где F - водосборная площадь в (км^2).

Слой стока Y - слой воды в миллиметрах, равномерно распределенной по площади F и стекающей с водосбора за некоторый промежуток времени T суток,

$$Y = \frac{86,4 QT}{F} \quad (1.4.3)$$

Слой стока за год в миллиметрах:

$$Y = 31,54 \text{ мм} \quad (1.4.4)$$

Коэффициент стока - отношение величины слоя стока с данной площади за некоторый промежуток времени к величине слоя атмосферных осадков, выпадающих на эту площадь за тот же промежуток времени, т. е. $k = Y/X$, $0 < k < 1$. Коэффициент стока - величина безразмерная.

1.4.2 Формирование стока рек

Сток образуется в результате выпадения дождей или таяния снега и льда в горах. В обоих случаях часть воды, поступившей на поверхность земли, затрачивается, прежде всего, на заполнение отрицательных форм микрорельефа (углублений) и на впитывание в почву. Только после заполнения отдельных углублений и притом после того момента, как интенсивность дождя или таяния снега и льда станет превосходить интенсивность инфильтрации, возникает сток.

Вода стекает по поверхности земли обычно не сплошным слоем, а в виде отдельных тонких струй или ручейков, которые сливаются вместе, доходят до русел сначала временных водотоков, а потом образуют постоянные потоки, несущие свои воды в сформировавшемся русле. Сток, происходящий по поверхности земли, называется поверхностным или склоновым стоком. Сток, происходящий по русловой сети водосбора, называется русловым или речным стоком.

Поверхностный сток не отождествляется с понятием поверхностные воды. К поверхностным водам относятся воды рек, озер, водохранилищ. Во многих местах, как, например, в лесной зоне, поверхностный сток, как правило, невелик, а иногда и отсутствует вовсе. Большая часть дождевых и снеговых вод стекает

иными путями. Просачиваясь через почву, эти воды пополняют запасы почвенных и грунтовых вод и попадают в речную сеть подземными путями в виде почвенно-грунтового стока из зоны аэрации и собственно грунтового из более глубоких водоносных горизонтов.

В связи с этим выделяется почвенный (подповерхностный) сток и подземный (грунтовой) сток. Речной сток является суммарным поверхностным и подземным стоком. Суммарный речной сток путем расчленения гидрографа делят на две составляющие: на поверхностный (поводочный) и подземный сток. Последний является наиболее устойчивым.

В различных ландшафтных зонах и внутри зон соотношения между поверхностным и подземным стоком неодинаковы, что создает специфические особенности режима речного стока и его распределения по территории.

Сток представляет собой сложный природный процесс, обусловленный влиянием комплекса физико-географических факторов и хозяйственной деятельности. Основными факторами стока, определяющими его развитие, являются климатическим фактором на общем фоне воздействия климата на формирование стока и его величину проявляется влияние других, не климатических факторов.

Влияние их тем заметнее, чем меньше размеры бассейна и чем короче период, за который рассматривается это влияние.

Климат воздействует на сток не только непосредственно, но и через другие природные факторы: почву, растительность, рельеф.

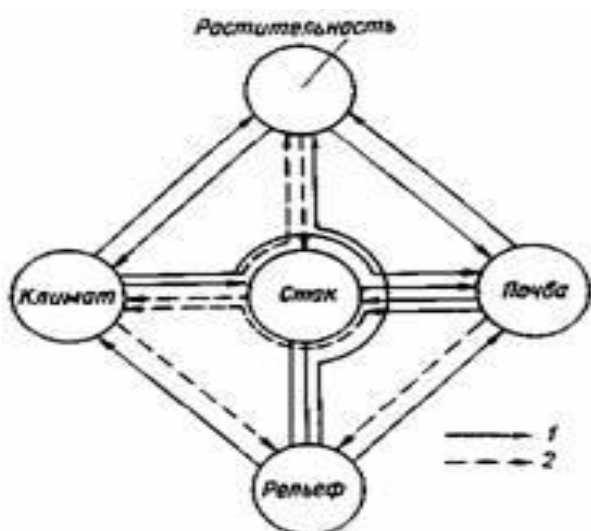


Рисунок 10. Схема взаимосвязи речного стока с основными физико-географическими факторами (по М. И. Львовичу).

1 - важные воздействия, 2 - второстепенные воздействия.

Все эти факторы находятся в постоянном взаимодействии. Действие различных природных факторов проявляется по-разному. Одни из них способствуют стеканию атмосферных осадков по земной поверхности, другие замедляют сток или вовсе исключают возможность его образования. Одним факторам, а также их взаимодействию между собой принадлежит главная роль в процессе формирования речного стока, другим второстепенная.

Влияние физико-географических факторов сказывается и на величине годового стока и на его режиме. Взаимосвязь между стоком и физико-географическими факторами раскрывается при изучении стока как элемента водного баланса.

Для любого речного бассейна можно составить уравнение водного баланса. Для отдельного конкретного года это уравнение имеет вид

$$X = Y + Z + U \quad (1.4.5)$$

где X - сумма атмосферных осадков; $Y = Y_{\text{П}} + Y_{\text{Г}}$ - полный речной сток ($Y_{\text{П}}$ - поверхностный сток, $Y_{\text{Г}}$ - грунтовой сток); Z - испарение; U - накопление или расходование влаги в бассейне.

Если в данном году, сумма атмосферных осадков больше чем суммы величин стока и испарения, то происходит накопление влаги в бассейне и

величина U входит в уравнение (1.4.5) со знаком плюс (+) в противном случае со знаком минус (-). Предполагая, что за длительного периода времени накопление и расходование влаги взаимно компенсируется, нетрудно получить уравнение водного баланса для среднего года за многолетний период:

$$\bar{Y} = \bar{X} - \bar{Z} \quad (1.4.6)$$

где X , Y , Z - средние многолетние величины осадков, стока и испарения. Это уравнение справедливо для случая, когда поверхностный и подземный водоразделы совпадают. При несовпадении водоразделов происходит или постоянное поступление вод из соседнего бассейна, или отдача их W . В этом случае уравнение водного баланса будет иметь вид:

$$\bar{Y} = \bar{X} - \bar{Z} + \bar{W} \quad (1.4.7)$$

1.4.3 Влияние климатических факторов на сток

Анализ уравнения водного баланса речных бассейнов за многолетний период $Y = X - Z$ позволяет сделать вывод, что средний многолетний сток зависит, прежде всего, от климатических факторов, а затем уже от всех других природных факторов, оказывающих влияние главным образом на впитывание воды в почву и испарение.

Расход воды на инфильтрацию зависит от свойств почвы, а испарение почвенной влаги - от соотношения тепла и влаги в речном бассейне.

При большом содержании воды в почве испарение ограничивается количеством поступающего тепла, при малом оно зависит от наличия влаги в почве. В последнем случае тепловые ресурсы позволили бы испариться большему количеству воды, но из-за относительно малого ее содержания в почве испаряться нечему.

Испарение с поверхности речного бассейна складывается из испарения с почвы, включая транспирацию растений, с поверхности водоемов, находящихся на его территории, и с поверхности снежного покрова. Если испарение с водной поверхности и с поверхности снега определяется метеорологическими факторами, то суммарное испарение с поверхности суши, помимо метеорологических факторов, зависит от содержания воды в почве, их водно-физических свойств и характера растительного покрова.

Процесс транспирации растений зависит не только от соотношения тепла и влаги, но и от физиологических особенностей растений. Все это явилось причиной, почему обычно величина испарения с поверхности речных бассейнов определяется суммарно, хотя в последнее время стали появляться способы дифференцированной оценки испарения с различных угодий. Для этой цели служат результаты экспериментальных исследований на водобалансовых станциях. Впервые правильная и научно обоснованная оценка роли отдельных факторов в испарении с поверхности речных бассейнов была сделана Э. М. Ольдекопом в его работе "Испарение с поверхности речных бассейнов" (1911 г.). Ольдекоп исходил при этом из следующих положений. При малых количествах осадков они полностью испаряются. По мере увеличения количества осадков величина испарения возрастает.

Но это увеличение испарения продолжается до некоторого предела, соответствующего определенному количеству осадков. При дальнейшем увеличении их добавочные порции осадков уже не вызывают увеличения испарения, а затрачиваются на сток, и величина испарения становится почти постоянной. Эту предельную величину испарения Ольдекоп назвал максимально возможным испарением.

Для расчета средней годовой величины испарения применяются методы М. И. Будыко и А. Р. Константинова. В основе метода Будыко лежит уравнение связи между тепловым и водным балансом территории.

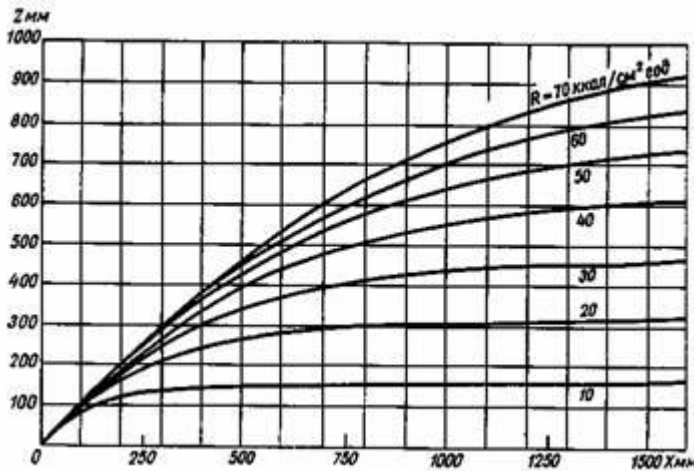


Рисунок 11. Номограмма для вычисления средней многолетней величины испарения (по М. И. Будыко).

В общем виде это уравнение показывает зависимость между коэффициентом испарения Z/X и отношением радиационного баланса R к теплу LX , затрачиваемому на испарение осадков:

$$\frac{Z}{X} = f\left(\frac{R}{LX}\right) \quad (1.4.8)$$

где L - скрытая теплота испарения.

В аридных условиях при малых величинах осадков X все осадки испаряются: $Z/X > 1$ и R/LX велико. В гуменной зоне по мере увеличения осадков величина испарения растет, но при ограниченных запасах тепла не может превзойти максимально возможную: $Z_0 = R/L$. Таким образом, Z/X и R/LX уменьшаются.

Для удобства расчетов зависимость (8) представлена в виде номограммы (рис. 91), позволяющей по средней годовой сумме осадков и годовой величине радиационного баланса определить годовую величину испарения.

Метод Константинова основан на анализе процессов турбулентного обмена водяного пара в атмосфере, обуславливающих испарение. Для расчета испарения методом турбулентной диффузии необходимо иметь данные измерений градиентов температуры,

Влажности воздуха и скорости ветра в приземном слое. Константинов показал, что эти градиенты меняются с изменением температуры и влажности воздуха, измеряемых на высоте 2 м. Используя эту зависимость, Константинов составил номограмму, позволяющую определить норму годового испарения (Z) по средней годовой температуре (T) и влажности воздуха (E), получаемым по наблюдениям на сети метеорологических станциях.

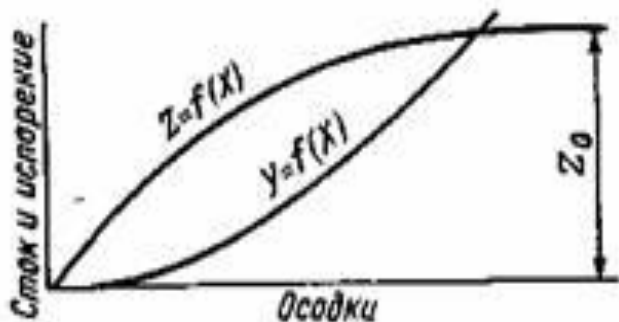


Рисунок 12. Кривые зависимости стока (Y) и испарения (Z) от осадков (X) при некотором значении максимально возможного испарения (Z_0)

Существуют и другие методы расчета испарения, излагаемые в специальном руководстве. До недавнего времени широко использовались методы П. С. Кузина и Б. В. Полякова.

При наличии осадков и стока величина суммарного испарения за многолетний период может быть определена из уравнения водного баланса $Z = X - Y$. Это наиболее простой и вместе с тем наиболее точный метод. Подобные расчеты суммарного испарения позволили построить карты испарения и дали обширный материал для разработки методов определения величины испарения с поверхности суши по метеорологическим данным, упоминаемым выше. Значение

этих методов заключается в том, что они позволяют определить величину испарения с поверхности любого речного бассейна.

Особенности влияния осадков на величину среднего многолетнего стока нетрудно выяснить при помощи уравнения водного баланса, если в нем заменить величину испарения его значением, определяемым по формуле Будыко.

В таком случае это уравнение принимает вид:

$$Y = X - f(X, Z_0), \quad (1.4.9)$$

где $f(X, Z_0)$ - функция, выражающая зависимость испарения от осадков и максимально возможного испарения.

На рис. 3 изображены зависимости испарения и стока от осадков в соответствии с этой формулой при некотором определенном значении Z_0 . Для отдельных интервалов значений X на кривой, изображающей зависимость стока от осадков, эта зависимость может быть выражена с известным приближением линейным уравнением вида $y = ax + b$.

Для нижней части кривой, т. е. при малых количествах осадков, когда большая часть их затрачивается на испарение, коэффициент (a) мал; по мере увеличения количества осадков все большая часть их идет на формирование стока, поэтому коэффициент, a возрастает и постепенно приближается к единицу. Эти теоретические кривые впервые были даны Э. М. Ольдекопом.

Различия в зависимости годового стока от осадков позволили Ольдекопу установить два крайних типа речных бассейнов. К одному типу относятся те из них, для которых указанная зависимость укладывается в нижней части кривой, изображенной на рис. 93. Эти бассейны располагаются в зоне недостаточного увлажнения. Для рек этой категории зависимость стока от осадков выражена менее отчетливо, чем зависимость испарения от осадков.

К рекам второй категории, по Ольдекопу, относятся реки, бассейны которых расположены в зоне устойчивого избыточного увлажнения. Для этих рек зависимость стока от осадков выражена более отчетливо, чем зависимость испарения от осадков; величина испарения определяется здесь преимущественно тепловым режимом. Очевидно, бассейны рек, расположенные в зоне неустойчивого увлажнения, занимают промежуточное положение. Данные фактических наблюдений хорошо подтверждают справедливость сказанного.

До тех пор, пока было очень мало данных о речном стоке, для его определения производились расчеты испарения по различным эмпирическим формулам или номограммам. На основании формулы (135), располагая данными об осадках, оценивался речной сток.

В настоящее время в СССР и во многих других странах появилось достаточно данных непосредственных измерений стока, поэтому отпала необходимость его определения по испарению и осадкам. Следует еще учитывать, что даже наиболее надежные расчетные методы испарения не исключают существенных погрешностей при расчете стока по разности $X - Z$.

Влияние климатических факторов прослеживается и на изменении относительной величины стока, выраженной в виде коэффициента стока $k = Y/X$, где Y - средний многолетний сток в миллиметре, X - средняя многолетняя сумма осадков за год, выпадающих в пределах данного бассейна. Заменяя в этой формуле величину Y равной ей величиной $X - Z$, получим

$$k = (X - Z)/X = 1 - Z/X \quad (1.4.10)$$

Из этой формулы следует, что коэффициент стока зависит от годовой суммы осадков и тех факторов, которые определяют величину испарения Z . Выше уже отмечалось, что величина Z растет медленнее, чем годовая сумма осадков, и что, начиная с некоторой величины X величина Z становится почти постоянной.

Отсюда следует, что с увеличением X дробь Z/X уменьшается, а следовательно, коэффициент стока растет. Справедливость этого положения хорошо подтверждается фактическими данными. В зоне избыточного увлажнения, в северных районах, коэффициент стока достигает 0,80, в то время как в степных и полупустынных районах он падает ниже 0,1. Зависимость стока и его коэффициента от климатических факторов была положена в основу разработки расчетных формул коэффициента стока, широко применявшихся ранее для определения стока при отсутствии гидрометрических наблюдений на реках.

1.4.4 Влияние почвы на сток

Влияние почвенного покрова на сток и его подземную и поверхностную составляющие осуществляется через процессы инфильтрации и испарения. В зависимости от сочетания тех или иных водно-физических свойств почв при данных особенностях климата увеличивается или уменьшается то количество влаги, которое задерживается в верхнем слое почв и почво-грунтов зоны аэрации и, следовательно, может быть израсходовано в дальнейшем на испарение и транспирацию растениями. С другой стороны, этими же условиями определяется и то количество влаги, которое выходит за пределы активного слоя почв и расходуется на пополнение запасов грунтовых вод, участвуя в дальнейшем в питании рек этими водами.

Воздействие почвенного покрова на сток и другие элементы водного баланса раскрыто в предложенных М. И. Львовичем теоретических схемах. Представленные на рис. 94 теоретические кривые характеризуют изменчивость элементов водного баланса в зависимости от инфильтрационной и водоудерживающей способности почв. Рассматриваются два случая совокупного воздействия этих свойств.

В первом случае инфильтрационная и водоудерживающая способности усиливаются параллельно. По мере усиления этих свойств непрерывно

увеличивается расход на испарение и транспирацию. Поверхностный сток уменьшается, а расход на пополнение запасов грунтовых вод увеличивается, хотя и незначительно. Это происходит до некоторых оптимальных величин впитывания влаги в почву и удержания её воды. При этих сочетаниях поверхностный сток достигает минимума, а подземный - максимума. По мере дальнейшего усиления инфильтрационной и водоудерживающей способности создаются условия, при которых атмосферная влага, интенсивно впитываясь в почву, удерживается в ней и в основном расходуется на испарение. Полный речной сток уменьшается (рис.4 а).

Во втором случае при слабой инфильтрационной и относительно высокой водоудерживающей способности вся атмосферная вода стекает по поверхности почвы. При малом содержании воды в почве испарение мало (нечему испаряться) и нет пополнения запасов подземных вод.

При относительно высокой инфильтрационной и слабой водоудерживающей способности в пределе вся вода, поступающая на поверхность, просачивается вглубь и расходуется на питание подземных вод. В этих условиях отсутствует поверхностный сток и испарение мало. При некоторых средних значениях рассматриваемых свойств почв и удержания воды в почве в пределах распространения корневой системы растений суммарное испарение велико. Изменения полного речного стока обратны изменению испарения (рис. 4 б).

При слабом впитывании воды в почву речной сток формируется за счет поверхностного стока, при малой аккумуляции воды в почве и высокой инфильтрации - за счет питания подземными водами.

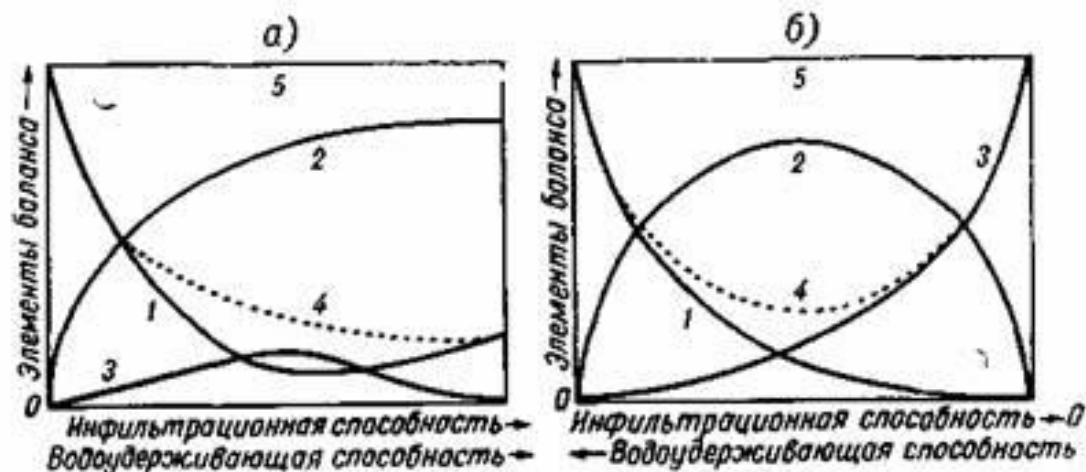


Рисунок 13. (1) Принципиальные схемы зависимости поверхностного стока; (2) Испарение; (3) Питания рек подземными водами; (4) Полного речного стока от инфильтрационной и водоудерживающей способности почвенного покрова при совместном их действии; (5) Осадков (по М. И. Львовичу).

а - прямое соотношение инфильтрационной и водоудерживающей способности; б - обратное соотношение.

Рассмотренные схемы характеризуют влияние почвенного покрова на сток и другие элементы водного баланса в чистом виде, вне воздействия других факторов, при постоянстве атмосферных осадков.

Как известно, водно-физические свойства почвы меняются с изменением ее влажности, а так как влажность почвы испытывает сезонные колебания, то и соотношения элементов водного баланса не остаются постоянными, меняется и структура речного стока. Изложенные общие закономерности имеют принципиальное значение и характеризуют тенденцию изменения речного стока под влиянием основных свойств почвенного покрова. Примеры количественного воздействия почвенного покрова на режим речного стока не единичны.

1.4.5 Влияние геологического строения речного бассейна на сток

Геологическое строение речного бассейна определяет условия накопления и расходования подземных вод, питающих реки. В связи с этим литологический состав горных пород, характер их залегания и глубина водоупорно являются существенными факторами формирования стока, влияющими на его величину и распределение во времени. Наиболее отчетливо это влияние проявляется при наличии мощных горизонтов хорошо водопроницаемых рыхлых или трещиноватых пород, воды которых дренируются речными долинами.

Влияние это усиливается при хорошей инфильтрационной способности почв и грунтов зоны аэрации. В этих условиях горные породы являются аккумуляторами влаги, обуславливающими равномерное питание рек. Речной сток оказывается зарегулированным, и его величина может быть больше по сравнению с величиной стока бассейна реки, сложенного слабо водопроницаемыми породами. Велико влияние на сток заарестованных горных пород, слагающих речные бассейны. Интенсивность этого влияния зависит также от типа и возраста карста. В карстовых районах, особенно там, где заарестованные породы не покрыты четвертичными отложениями, поверхностный сток обычно отсутствует, атмосферные осадки поглощаются воронками, полями, просачиваются по трещинам и пополняют запасы подземных вод.

Пути подземного стока весьма разнообразны, и не всегда область питания и распространения подземных вод совпадает с областью дренирования их реками. Это характерно для областей распространения карста. Так, в центральной части Силурийского заарестованного плато реки отсутствуют, так же как и в области Крымской Яйлы, весьма обильно орошаемой осадками. Реки, берущие начало в периферийной части Силурийского плато, отличаются повышенным стоком. Область максимального стока Яйлы располагается в зоне обильных выходов грунтовых вод на высоте расположения глинистых сланцев, подстилающих корыстующиеся известняки. При несовпадении поверхностного и подземного водоразделов под влиянием различного характера водообменное влияние карста

на речной сток может быть положительным (сток увеличивается) и отрицательным (сток уменьшается) по сравнению с зональным стоком.

Отчетливое влияние карста проявляется на величине стока и режиме рек с малыми площадями водосборов. Примеры влияния карста на речной сток многочисленны. Они приводятся как в советской (П. В. Молитвин, Л. А. Владимиров, В. А. Балков, О. Л. Маркова и др.), так и в зарубежной литературе.

Отклонение речного стока от его зональной величины возможно также в случаях, когда речной бассейн занимает, то или иное положение по отношению к области питания или разгрузки подземных вод артезианских бассейнов.

В области питания артезианских вод характерны безвозвратные потери речного стока на просачивание в глубокие артезианские водоносные горизонты.

В области разгрузки артезианских вод реки получают дополнительное питание. На это явление обращает внимание Б. И. Куделин. Так, согласно его исследованию, потери речного стока на водосборах рек Днестровско-Донецкой впадины (бассейн верхней части Сейма и его притоков), расположенных в области питания артезианского бассейна, достигают в среднем за год от 1 до 2 л/(с*км²).

С геологическими факторами стока тесно связано воздействие на величину стока глубины эрозионного вреза. По мере углубления эрозионного вреза увеличивается вероятность про резания руслом водоносных горизонтов и увеличения питания рек подземными водами.

Глубина эрозионного вреза обычно возрастает с увеличением площади водосбора. В связи с этим при одинаковых климатических условиях величина годового стока за счет слабого питания подземными водами оказывается меньше на малых и временных реках, чем на средних реках, полностью для данных условий эрозионного вреза дренирующих подземные воды.

Различия стока малых и средних рек в соответствии с зональным распределением глубин залегания грунтовых вод уменьшаются в районах с

влажным климатом и увеличиваются в засушливых районах. При сравнении средних величин годового стока с размерами площади речного бассейна подразумевается именно эта закономерность: площадь в данном случае является показателем глубины эрозионного вреза, полноты дренажа подземных вод реками, а не генетическим фактором.

1.4.6 Влияние растительности на речной сток

Непосредственное влияние растительности на сток сравнительно невелико. Оно заключается в увеличении шероховатости земной поверхности, вследствие чего замедляется стекание воды по поверхности земли и увеличивается возможность инфильтрации влаги в почву. В значительно большей мере проявляется влияние растительности, в особенности леса, на отдельные элементы водного баланса бассейнов: просачивание, испарение, отчасти осадки.

Теоретические исследования и экспериментальные наблюдения за элементами водного баланса на опытных водосборах, логах, облесенных и открытых, как в нашей стране, так и за рубежом позволили ученым сделать следующие выводы относительно различия в структуре водного баланса поля и леса.

1. Осадков в лесу может выпадать больше, чем на открытой территории; это различие связано с изменением циркуляции воздуха над лесом и улучшением благодаря этому условий конденсации атмосферной влаги. Высота снега в лесу увеличивается за счет переноса его с полей на опушки леса, особенно заметного в лесостепной и степной зонах.

2. Не все осадки достигают поверхности почвы. Часть их задерживается кроной деревьев (в хвойном лесу больше, в лиственном меньше) и испаряется.

3. Суммарное испарение в лесу может быть и больше и меньше, чем в поле. Это зависит от хозяйственного освоения территории, типа леса, продуктивности лесных и полевых угодий. Так, в сосновых лесах расход влаги на испарение

меньше, чем в еловых и березовых, а на высокопродуктивной пашне больше, чем в малопродуктивном лесу.

При оценке расхода воды лесом и полем нужно иметь в виду зависимость расходной части водного баланса от приходной. Эта зависимость хорошо выражена в районах недостаточного увлажнения, где максимально возможное испарение превосходит осадки. В таких условиях расход воды лесом или полем зависит не столько от потребностей их в воде, сколько от наличия воды, а в лесу ее обычно больше, чем в поле.

4. В лесу, как правило, водопроницаемость почвы выше, чем в поле. Этому способствует не только мощная корневая система деревьев и подлеска, но и лесная подстилка. Значительная роль принадлежит также рыхлым, частью структурным, богатым гумусом верхним слоям почвы в лесах. Лесная подстилка обладает большой влагоемкостью и предохраняет почвенные поры от заиливания. Водопроницаемость лесных почв велика, но неодинакова. В естественных условиях просачивание воды в почву зависит от типа леса, возраста древостоя и степени излечивания. Дубовые, сосновые, ясеневые насаждения, обладая глубокой и разветвленной корневой системой, повышают водопроницаемость почвы по сравнению с почвой в еловых насаждениях.

5. Поверхностный сток как снеговых, так и дождевых вод в лесу крайне мал. Это является следствием хорошей инфильтрационной способности лесных почв. Просачиванию воды в почву весной способствуют к тому же относительно меньшие интенсивность снеготаяния весной и глубина промерзания почвы зимой по сравнению с полем. Нередко дожди, вызывающие хорошо выраженные паводки в речных бассейнах, лишенных леса, в лесу не образуют паводочного стока. Практически отсутствует весенний поверхностный сток в сосновых лесах, произрастающих на песчаных почвах.

Он наблюдается в хвойных на супесчаных почвах и несколько возрастает в смешанных и лиственных насаждениях на суглинистых подзолистых почвах.

6. В лесу питание грунтовых вод более обильное, чем в поле. При дренировании подземных вод речной сетью это приводит к увеличению грунтового стока в реки и формированию устойчивой межени. В этом большое водоохране и регулирующее значение леса.

7. Рубки леса, выпас скота нарушают лесную подстилку, ухудшают инфильтрационную способность почв и видоизменяют водный баланс. Степень этого влияния разная. После механизированных рубок с применением трелевочных тракторов водоохране значение лесов даже после возобновления древостоев надолго ослабляется вследствие ухудшения водорегулирующей способности лесных почв.

Вопрос о влиянии леса на сток оставался в течение долгого времени дискуссионным. В настоящее время можно считать установленным, что влияние лесов на водность (модули стока) зависит от ряда причин и не может решаться одинаково при различных природных условиях и хозяйственной деятельности человека.

Прежде всего следует иметь в виду, что распространение лесов и сток в естественных условиях находятся в тесной зависимости от климата. При одинаковых климатических условиях и одинаковой лесистости это влияние зависит от геоморфологических условий, с которыми тесно связаны процессы стекания воды по поверхности земли, положения зеркала грунтовых вод, физических и водных свойств почвы, состава и полноты насаждений, способов рубки лесов и характера и продуктивности поля, с которым сравнивается сток облесенных территорий.

Влага, просачивающаяся в почву в лесных бассейнах, попадает в речную сеть почти исключительно подземным путем. На малых реках обычно вследствие незначительной глубины эрозионного вреза русел значительная часть воды уходит за пределы бассейнов и тем самым переходит в категорию безвозвратных для этих бассейнов потерь.

При одинаковых размерах водосборов малых речных бассейнов, одинаковых климатических и гидрогеологических условиях величина безвозвратных потерь на инфильтрацию возрастает с увеличением лесистости, а следовательно, происходит и уменьшение стока.

Так, например, по данным Валдайской гидрологической лаборатории (лесная зона), сток в безлесном бассейне Приусадебного лога (площадь водосбора $0,36 \text{ км}^2$) в среднем годовом равен 255 мм, в бассейне же лога Таежного ($0,45 \text{ км}^2$) при лесистости 98% сток снижается до 192 мм. На Придеснянской станции при лесистости 90% сток составляет 50 мм, при лесистости 33% - 92 мм. По мере увеличения площадей водосборов вследствие увеличения глубины эрозионного вреза речных русел все большая часть просачивающихся вод возвращается в речную сеть данного бассейна в связи с усилением ее дренирующей роли.

В соответствии с этим различия в стоке безлесных и лесистых бассейнов постепенно сглаживаются. Как уже отмечалось выше, в крупных речных бассейнах влияние не климатических факторов, в том числе и леса, становится менее явным и выявить это влияние в "чистом" виде труднее вследствие совместного компенсирующего действия других факторов. Следует, кроме того, отметить, что по мере увеличения речных бассейнов различия в лесистости крупных речных бассейнов обуславливаются и климатическими причинами, т. е. теми же, что и различия в стоке.

1.4.7 Влияние рельефа на речной сток

Непосредственное влияние уклонов местности на речной сток сравнительно невелико, вследствие того что роль инфильтрационной способности почв перекрывает зависящее от этого фактора увеличение или уменьшение скорости стекания вод по земной поверхности. Большое влияние рельеф оказывает на отдельные элементы водного баланса речных бассейнов: осадки, инфильтрацию влаги в почво-грунты и испарение.

Это влияние рельефа проявляется различно в зависимости от крупности его форм. Особенно значительно оно в горах, где с высотой местности увеличивается годовая сумма осадков, снижается температура воздуха, следствием чего является уменьшение испарения и соответственно увеличение стока. С высотой, как правило, увеличивается доля твердых осадков, что приводит к увеличению коэффициента стока, а следовательно, и величины стока, а также к существенному изменению водного режима, наиболее выраженному на высокогорных реках с ледниковым питанием.

Таким образом, вертикальная поясность климатических факторов стока вызывает вертикальную поясность величин стока. Это обстоятельство пазов-либо ряду гидрологов в Советском Союзе и за рубежом установить эмпирические зависимости величин годового стока от средней высоты водосборов.

Так как изменение количества осадков с высотой носит локальный характер (влияет ориентировка горных склонов, степень защищенности, экранизации района от волосоносных масс воздуха), а изменение стока обуславливается геологическими и почвенными условиями, резко меняющимися в горах, то и зависимости стока от высоты водосборов являются порайонными. Такие зависимости используются для пространственной интерполяции величин речного стока, что позволяет составлять карты стока и для сложных горных условий при ограниченности исходных данных.

В горах происходит перераспределение твердых осадков в речном бассейне. В горных котловинах, глубоких ущельях, у подножия горных склонов в результате схода снежных лавин и ветровой миграции скапливаются большие массы снега, талые воды которых служат источником питания горных рек в летний период.

В равнинных, особенно степных, районах ветер сносит снег с открытых склонов в балки, овраги, речные долины. Подобная аккумуляция снега в гидрографической сети приводит к увеличению поверхностного стока снеговых

вод. При наличии бессточных понижений на водосборах снеговые и дождевые воды аккумулируются в них и расходуются в дальнейшем на инфильтрацию и испарение, оказывая, таким образом косвенное влияние на сток и его распределение в году.

з) Влияние озаренности на годовой сток рек

С изменением озаренности изменяются соотношения между площадями, покрытыми водой и занятыми сушей. Испарение же с водной поверхности и с поверхности суши неодинаково, что влечет за собой различия в величине испарения с поверхности речных бассейнов с различной озаренностью.

Испарение с водной поверхности и с поверхности суши изменяется неодинаково в различных физико-географических условиях, а следовательно, и влияние озаренности на величину годового стока неодинаково в различных районах. По данным А. С. Соколова, в лесной зоне при озаренности, меньшей 10%, уменьшение годового стока относительно невелико (менее 10%). При озаренности 30-50% и более уменьшение стока в лесной зоне становится довольно значительным и может достигать 50% и более. К югу влияние озаренности на уменьшение годового стока быстро увеличивается.

1.4.8 Влияние хозяйственной деятельности на сток

Хотя эта тема заслуживает специального изложения, ограничимся здесь лишь общими замечаниями. В современных условиях широкого использования водных ресурсов и проведения агрономических, Агро лесомелиоративных и гидромелиоративных мероприятий на обширных территориях страны хозяйственная деятельность человека воздействует как непосредственно на сток, так и на условия его формирования. Создание водохранилищ (иначе говоря, увеличение озаренности) вызывает увеличение потерь воды на испарение, а

следовательно, и некоторое уменьшение стока, в особенности в засушливых районах.

Но эта неизбежная издержка с избытком перекрывается пользой от водохранилищ, позволяющих уменьшать сток в периоды паводков и увеличивать в периоды межени. Огромный размах строительства водохранилищ в Советском Союзе позволил увеличить ресурсы устойчивого речного стока страны почти на 25%. Это большое достижение народного хозяйства. Искусственное орошение в зоне недостаточного увлажнения требует водозабора из рек, создает совершенно новые условия водного режима почв, вызывает увеличение расхода воды на испарение и транспирацию и тем самым уменьшает величину стока рек.

В ряде районов Средней Азии и Кавказа воды некоторых рек целиком разбираются на орошение и в настоящее время не достигают рек, в которые они некогда впадали.

Таковы, например, Зеравшан, прежде впадавший в Амударью, Сох, Исфайрамсай - притоки Сырдарьи и др. Водозабор на орошение из такой большой реки, как Сырдарья, достигает 40%.

Распашка территории, полевые лесонасаждения, мероприятия, проводимые по повышению плодородия почв, вносят изменения в структуру водного баланса и тем самым влияют на сток, главным образом в результате изменений водно-физических свойств почв. При социалистическом ведении сельского и лесного хозяйства эти изменения в нашей стране носят направленный характер. Многие мероприятия, преследующие цель повышения биологической продуктивности полей, состоят в регулировании почвенной влаги: увеличении влаги в почве путем задержания поверхностного стока или орошении в засушливых районах и ослаблении переувлажнения в районах избыточного увлажнения путем осушения.

Влияние земледелия на местный водный баланс территории и сток лучше изучено в зонах недостаточного и неустойчивого увлажнения.

Широко применяемые в сельском хозяйстве осенняя пахота, глубокая тракторная вспашка, безотвальная пахота, снегозадержание, создание полевых защитных лесных полос и т. д. направлены на повышение влажности почв на пашне и в конечном итоге на повышение урожайности.

Наиболее существенное влияние на преобразование водного баланса пахотных угодий в зоне недостаточного и неустойчивого увлажнения оказывает зяблевая вспашка. Почва, вспаханная осенью, остается разрыхленной до весеннего снеготаяния и обладает способностью задерживать значительно большее количество талой воды за счет снижения поверхностного склонового стока по сравнению с почвой, вспаханной весной.

Обобщенные Львовичем результаты экспериментальных исследований в разных природных зонах показывают, что под влиянием зяблевой пахоты поверхностный склоновый сток уменьшается: на юге лесной зоны СССР в 1,3- 1,5 раза, в лесостепной в 1,5-2,5 раза, в степной зоне в 2,5-5 раз. Лесные полосы предохраняют поля от сдувания с них снега, аккумулируют влагу, перехватывая склоновый поводочный сток. Этот гидрологический эффект может быть различным в зависимости от расположения лесных полос на склоне (поперек или вдоль него) и в зависимости от структуры и типа почв. При легких почвах лесные полосы аккумулируют больше воды по сравнению с тяжелыми.

До организации колхозного механизированного земледелия зяблевая пахота почти не применялась, поэтому во время весеннего снеготаяния почва была уплотненной, а ее инфильтрационная способность была более слабой. В этих условиях потери воды на сток с пашни были значительными, что способствовало увеличению поверхностного склонового стока и усилению эрозионных процессов. Отрицательное действие на водный режим почв оказывает, например, нерегулируемый выпас скота. При длительном использовании земель под выпас скота происходит смена видового состава луговой растительности, снижается ее продуктивность, разрежается дернина, почвенный покров уплотняется. В

результате, так же как при отсутствии зяблевой пахоты, инфильтрация в почву ухудшается, и создаются условия для увеличения поверхностного стока. По сравнению с целиной валовое увлажнение степных участков, используемых под выпас скота, меньше, а поверхностный сток с них больше.

В зоне избыточного увлажнения земледелие, очевидно, является менее действующим фактором формирования водного баланса территории по сравнению с мелиоративными мероприятиями: лесомелиорацией и эксплуатацией леса, использованием болотных массивов и заболоченных земель и их осушением. Гидрологическая роль всех этих мер усиливается при повышении урожаев и продуктивности лесов на осушенных землях. Изучение влияния этих мероприятий на водный режим территорий и рек является одной из современных проблем гидрологии.

1.4.9 Понятие о норме стока

Сток рек меняется из года в год. В этих колебаниях нет строгой закономерности. Вместе с тем величина годового стока колеблется около некоторой средней величины, причем амплитуда таких колебаний неодинакова в различных физико-географических районах.

Ряд величин годового стока можно рассматривать как ряд "случайных" величин. В математической статистике ряд, образованный случайными величинами, называется вариационным рядом. Одной из основных характеристик вариационного ряда является норма - средняя арифметическая величина.

Предполагается, что норма стока представляет собой устойчивую величину, т. е. средняя арифметическая величина, вычисленная за достаточно длительный период, остается постоянной независимо от прибавления новых членов к вариационному ряду. Понятие об устойчивости нормы стока является не совсем верным. Климатические факторы на больших пространствах не остаются

неизменными в течение длительных периодов, не только доисторических, но и исторических.

Имеется ряд свидетельств изменений климата, которые, естественно, вызывают изменения величин стока. На рис. 5 показаны колебания увлажненности Евразии и Северной Америки, полученные А. В. Шнитниковым по геологическим и историческим данным за длительный период времени. Эти колебания носят циклический характер с длительностью циклов около 1800 лет; влажные циклы сменяются засушливыми и на смену последним вновь приходят влажные. Помимо циклических колебаний стока, вызванных циклическими же колебаниями климатических факторов, изменения стока вызываются хозяйственной деятельностью человека.

Эти изменения носят обычно односторонне направленный характер. Учитывая циклические колебания стока, принято считать нормой годового стока среднюю арифметическую его величину, вычисленную за длительный период, включающий не менее двух полных циклов колебаний стока. Цикл состоит из двух фаз водности - многоводной и маловодной. Для установления периода вычисления нормы стока в практике гидрологических расчетов используется так называемая разностная интегральная кривая, дающая наглядное представление о циклах колебаний стока в пределах периода гидрометрических наблюдений (рис. 6). Такую кривую удобно строить в относительных отклонениях - в модульных коэффициентах $K_i = M_i / M_{cp}$, (где M_i - модуль стока i -того года, M_{cp} - средний модуль за весь период наблюдений). Кривая дает представление о нарастающей сумме отклонений годовых модульных коэффициентов K_i от среднего многолетнего значения $K_{cp} = 1$.

Период времени, для которого участок кривой наклонен вверх относительно горизонтальной линии (тангенс угла наклона прямой, соединяющей начало и конец отрезка кривой, больше единицы), соответствует многоводной

фазе, а период, для которого участок кривой наклонен вниз (тангенс угла наклона меньше единицы), соответствует маловодной фазе.

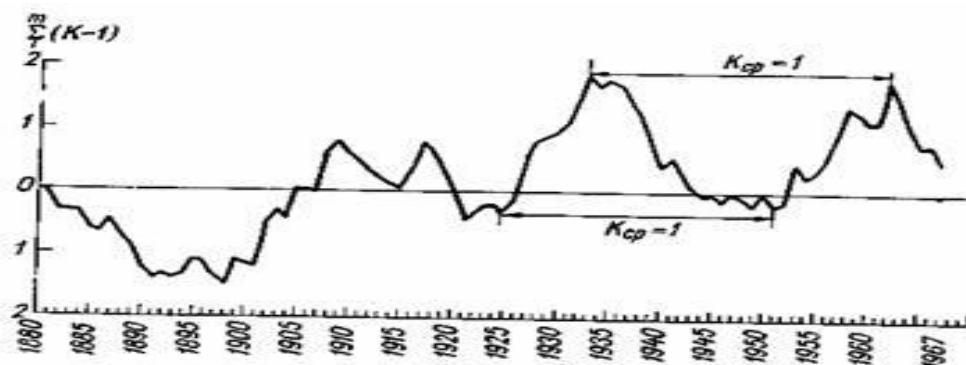


Рисунок 14. Разностная интегральная кривая модульных коэффициентов годового стока р. Западной Двины у г. Витебска.

Средний модульный коэффициент для любого отрезка времени может быть вычислен по формуле

$$K_{cp} = I + \frac{l_k - l_n}{n} \quad (1.4.11)$$

где l_k и l_n - конечная и начальная ординаты интегральной кривой для рассматриваемого периода; n - число лет в этом периоде. Очевидно, что K_{cp} за период, включающий одинаковое число маловодных и многоводных фаз (полных циклов), должно быть равно или близко к единице. За этот период и может быть рассчитана норма стока. Так, для определения нормы стока р. Западной Двины у г. Витебска может быть принят 28-летний период, с 1924 по 1952 г., и 29-летний период, с 1933 по 1962 г.

1.4.10 Карта стока

Для характеристики распределения стока на любой территории строятся карты стока, выраженного в слое стока или в модулях стока. Для построения карты норм годового стока предварительно по данным фактических наблюдений вычисляются нормы стока для отдельных речных бассейнов и их частей.

Полученные данные относятся к центрам тяжести речных водосборов. По нанесенным на карту величинам норм стока проводятся плавные линии, соединяющие точки с одинаковыми величинами норм стока, - изолинии стока. При проведении изолиний принимается во внимание распределение по территории основных факторов стока: атмосферных осадков, рельефа, почв, геологического строения, в горах - особенность высотной поясности.

Впервые в нашей стране карта стока была построена Д. И. Кочергиным для европейской части СССР (1927 г.) по данным всего лишь 30 пунктов наблюдений. Тем не менее, карта Кочергина давала в общем правильное представление об основных особенностях распределения стока на территории Русской равнины и в течение длительного времени служила источником для гидрологического обоснования многих гидротехнических проектов.

Позже сводные карты по Советскому Союзу были составлены С. Ю. Беликовым и Б. Д. Займовым (1937 г.), Б. Д. Займовым (1946 г.), В. А. Троицким (1947 г.) и К. П. Воскресенским (1962 г.).

Карта Воскресенского составлена в ГГИ на основе материалов наблюдений в 5690 пунктах. Помимо большей детализации, эта карта отличается от других карт тем, что на ней выделены области, где под влиянием местных факторов сток малых рек меньше или больше зональной величины, указанной на карте. На рис. 97 (см. вкладку) приведена уточненная другими авторами карта Воскресенского, опубликованная в Физико-географическом атласе мира (1964г.).

Имеются карты стока для всего земного шара. Такая карта была впервые опубликована в 1945 г. в СССР М. И. Львовичем и за рубежом немецким гидрологом В. Вундтом (1952 г.). Карты стока дают отчетливое представление об

особенностях распределения стока на той или иной территории. В этом прежде всего их географическое значение. Карты стока позволяют определить приближенную величину стока, а следовательно, и среднего многолетнего расхода любой реки, для которой отсутствуют данные непосредственных измерений. Распределение среднего многолетнего стока на территории СССР

Характерной особенностью в распределении среднего многолетнего стока на территории СССР является широтная зональность его, наиболее отчетливо выраженная в равнинных частях страны, и тенденция к уменьшению стока в направлении с запада на восток под влиянием континентальности климата. В равнинных частях нашей страны норма стока, как правило, уменьшается с севера на юг. Вместе с тем в пределах Русской равнины располагается широкая полоса повышенного стока (больше 300 мм), охватывающая бассейны рек Выга, Кеми, Онеги, Северной Двины, Печоры и др. К югу и северу от этой полосы сток уменьшается. Наименьших значений норма стока достигает в Причерноморской и особенно в Прикаспийской низменности, 20-10 мм и менее. На территории Западно-Сибирской равнины максимум стока наблюдается на широте 64-66° и составляет 250 мм (бассейн р. Пур). На побережье Карского моря сток меньше, около 200 мм, к югу уменьшается и в зоне степей равен около 10 мм.

Другой характерной чертой, помимо зональности, в распределении стока на территории СССР является отчетливо выраженное влияние рельефа. Даже относительно небольшие нарушения спокойного равнинного рельефа Русской равнины вызывают увеличение стока, что хорошо прослеживается в районах Валдайской, Приволжской и Среднерусской возвышенностей, Донецкого кряжа. Уральский хребет представляет собой обособленную интразональную область стока с более высокими значениями стока на западных склонах по сравнению с восточными. В бассейне р. Шугор отмечен максимум нормы стока для европейской части СССР - около 800 мм.

Окраинные горные системы Крыма, Кавказа, Средней Азии, Алтая, Саян характеризуются сложным распределением стока, в общем соответствующим распределению осадков. Склоны гор и возвышенностей, обращенные навстречу ветлогоночным воздушным циркуляциям и обильно орошаемые осадками, отличаются повышенным стоком.

На южных склонах Главного Кавказского хребта сток значительно больше, чем на северных. В бассейне р. Чхалта, в притоке Кодори, он достигает около 3000 мм в год. Во внутренних частях горных районов, защищенных высокими хребтами от приноса влаги, наблюдается резкое снижение нормы стока. Так, во внутренних областях Памира и Тянь-Шаня норма стока составляет всего лишь 60-70 мм в год. На Алтае, в засушливой Чуйской степи, норма стока снижается до 20 мм, в то время как в бассейне р. Томь она составляет около 1500 мм. Средний модуль стока для СССР в целом равен $6,2 \text{ л/(с*км}^2\text{)}$, что соответствует слою стока примерно 195 мм.

1.4.11 Колебания годового стока рек и его распределение в году

Колебания годового стока рек происходят под влиянием метеорологических факторов. Характер этого влияния меняется в зависимости от ландшафтных условий. Колебания годового стока рек можно охарактеризовать либо изменчивостью его в отдельные годы, либо путем анализа колебаний в хронологической последовательности.

Для характеристики изменчивости годового стока в практике гидрологических расчетов широко применяются методы математической статистики, в частности кривые распределения и обеспеченности. Кривые обеспеченности позволяют определить величину стока различной заданной обеспеченности ($P\%$) или повторяемости (в среднем 1 раз в N лет) без указания срока наступления расчетных величин. По материалам наблюдений строятся эмпирические кривые обеспеченности. Эмпирическая обеспеченность расходов ($P\%$) определяется по формуле

$$P = \frac{m - 0,3}{n \div 0,4} 100\% \quad (1.4.12)$$

где m - порядковый номер ранжированного ряда; n - число членов в ряду. Сглаживание и экстраполяция кривых до заданных пределов обеспеченности осуществляется аналитически с использованием некоторых типовых уравнений. В практике гидрологических расчетов чаще пользуются биномиальной асимметричной кривой, или кривой распределения Пирсона III типа.

Параметрами теоретической кривой обеспеченности являются:

- 1) средняя арифметическая величина ряда $\bar{Y}$;
- 2) коэффициент изменчивости, или вариации, годового стока C_v ;
- 3) коэффициент асимметрии годового стока C_s .

Параметры определяются по материалам наблюдений, коэффициент вариации годового стока характеризует степень изменчивости годовых величин стока относительно его нормы; он вычисляется по формуле:

$$C_v = \frac{\sigma_y}{\bar{Y}} \quad (1.4.13)$$

где σ_y - среднее квадратичное отклонение, численно равное

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_1^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n - 1}} \quad (1.4.14)$$

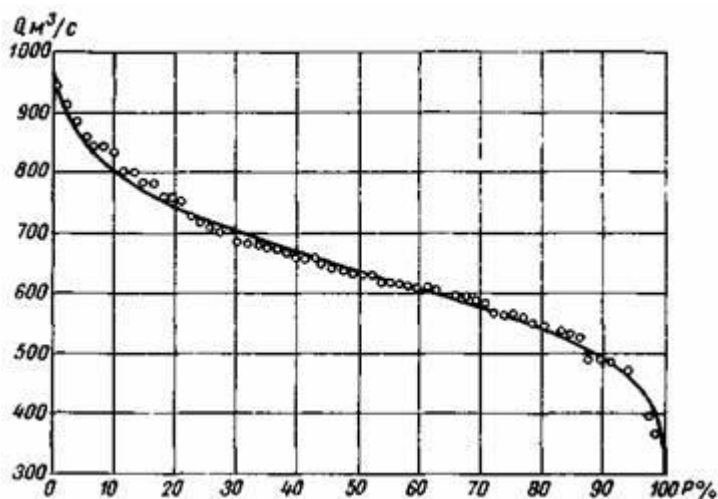


Рисунок 15. Кривая обеспеченности средних годовых расходов воды р. Томи у г. Новокузнецка за 1894-1957 гг.

Для точного вычисления C_s необходимы ряды с очень большим числом членов, поэтому на практике часто принимается эмпирическое соотношение $C_s = 2C_v$. Коэффициент асимметрии характеризует несимметричность ряда величин стока относительно его среднего.

2 Исходные данные

Для решения поставленной задачи создана гидрометеорологическая база многолетних данных:

- приземной температуры воздуха,
- осадков,
- речного стока,

- испарения (рассчитана),
- испаряемости (рассчитана).

Исходные данные делились на два типа. Первый тип картографическая информация – это карты Мирового водного баланса, которые «зафиксировали» для Африканского континента гидроклиматическую ситуацию с начала наблюдений до 1965 г. Второй тип – материалы наблюдений за температурой, осадками и стоком, по которым карты для современного (текущего) климата.

Перечень исходных данных.

1. Атлас мирового водного баланса (приложение к монографии Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли) издания 1974 г.
2. Ежемесячные климатические данные по приземной температуре и осадкам в 400-х узлах расчетной сетки с шагом 2.5° с 1901 по 2014 гг.
3. В работе рассчитаны среднегодовое значения испарения за периоды с 1901 по 1965 и с 1966 по 2014 гг.
4. В работе рассчитаны среднегодовое значения испаряемости за периоды с 1901 по 1965 и с 1966 по 2014 гг.
5. Данные по речному стоку для 3-х гидрологических постов.
6. Рассчитан дефицит влаги (Dв), как разница максимально возможного (испаряемости) и фактического испарения.

Массив данных содержит картографические материалы основных составляющих водного баланса до 1965 г. и фактические до 2014 г.

2.1 Карты мирового водного баланса

На рисунке 2.1 представлена карта Мирового водного баланса избытка и дефицита водных ресурсов речного стока, но в ее основе лежал целый пакет карт фрагменты которых использованы в работе и представлены на рисунках 2.2 - 2.5).

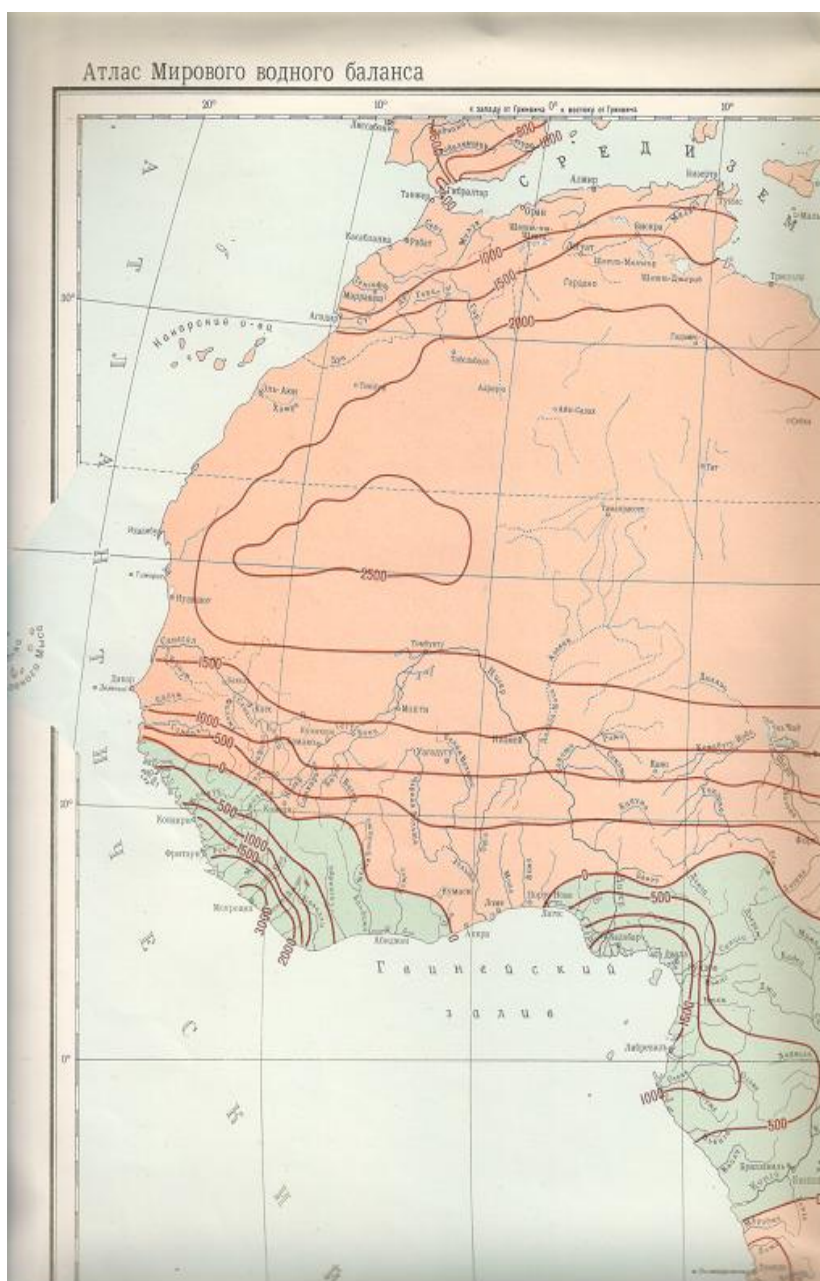


Рисунок 2.1 Избыток и дефицит водных ресурсов речного стока.

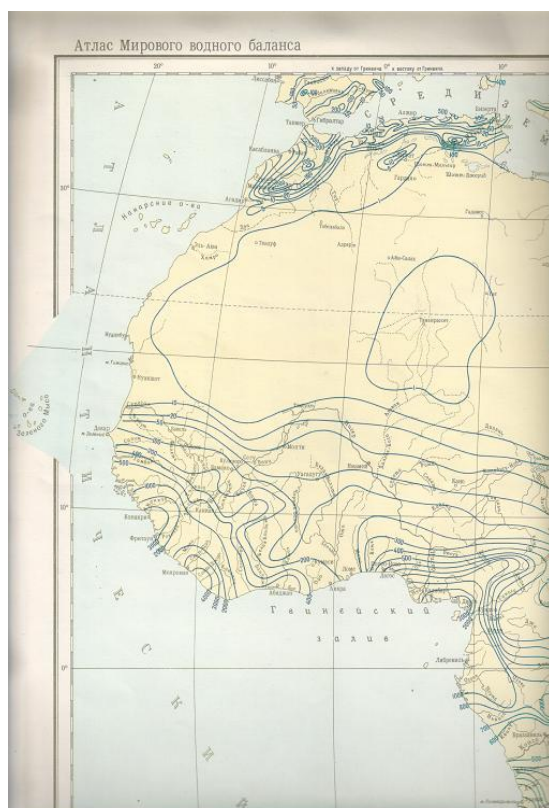


Рисунок 2.2 Слой годового стока (Y), мм

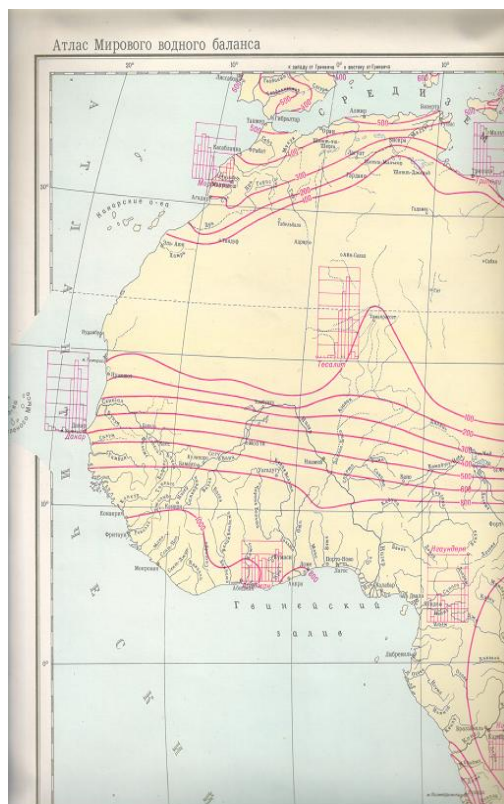


Рисунок 2.3 Слой годового испарения (E), мм

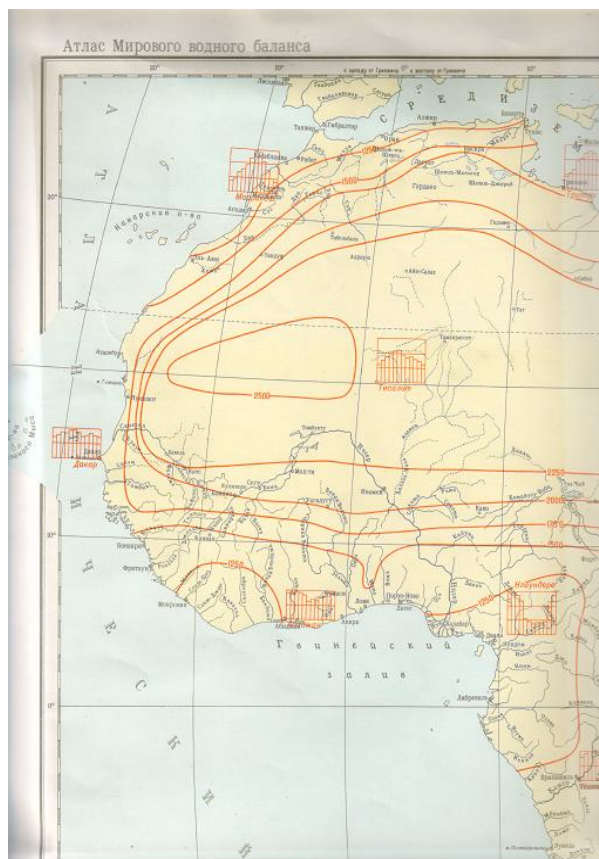


Рисунок 2.4 Слой годовой
испаряемости (E_0), мм

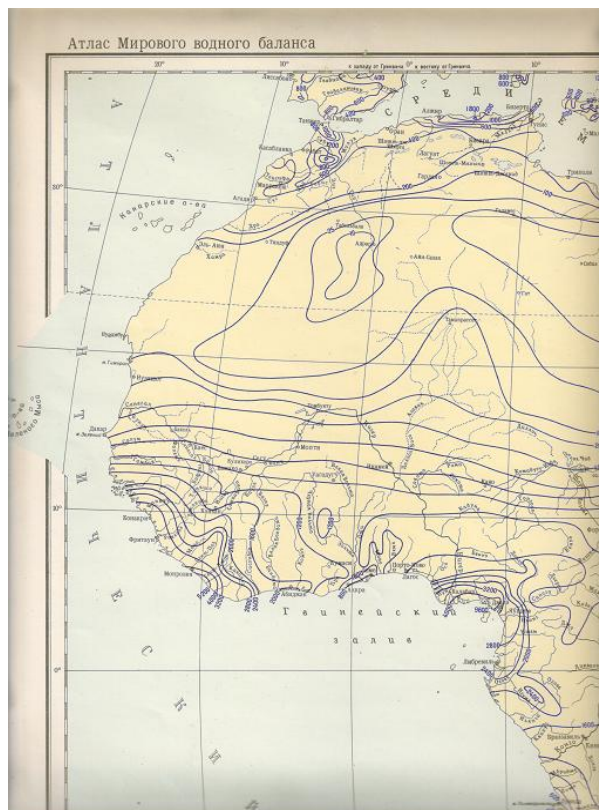


Рисунок 2.5 Слой годовых
осадков (X), мм

2.2 Ряды наблюдений за осадками и температурой

В качестве современных климатических характеристик использованы ежемесячные данные по приземной температуре и осадкам в 400-х узлах расчетной сетки с шагом 2.5° с 1901 по 2014 гг. Данные находятся на интернет ресурсе <http://climexp.knmi.nl/start.cgi?id=someone@somewhere>.

Примеры хронологических графиков хода осадков и температуры представлены на рисунках 2.6 и 2.7.

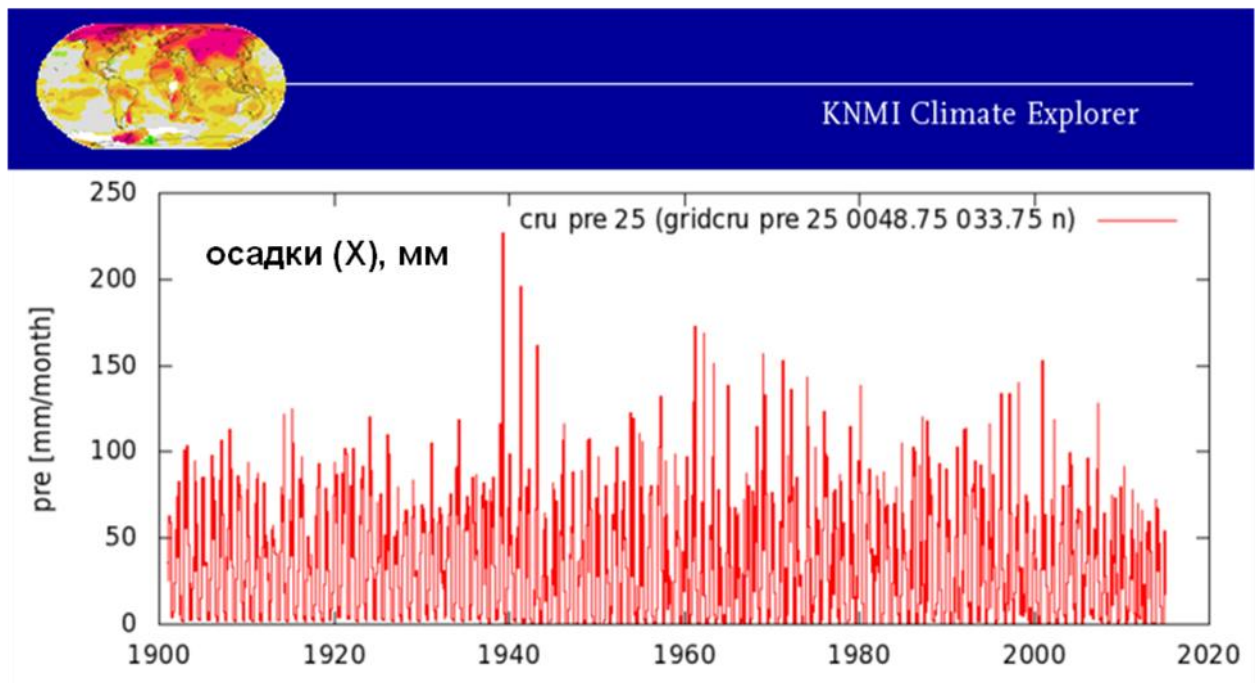


Рисунок 2.6. Хронологический график хода осадков.

Пример карт представлен на рисунках 8 и 9 раздела 1.3.1 температура. На рисунке 9 показана карта изменений температуры от периода 1901 – 1965 к периоду 1966 – 2014 гг.

Подобные карты для осадков представлены на рисунках 2.8 и 2.9.

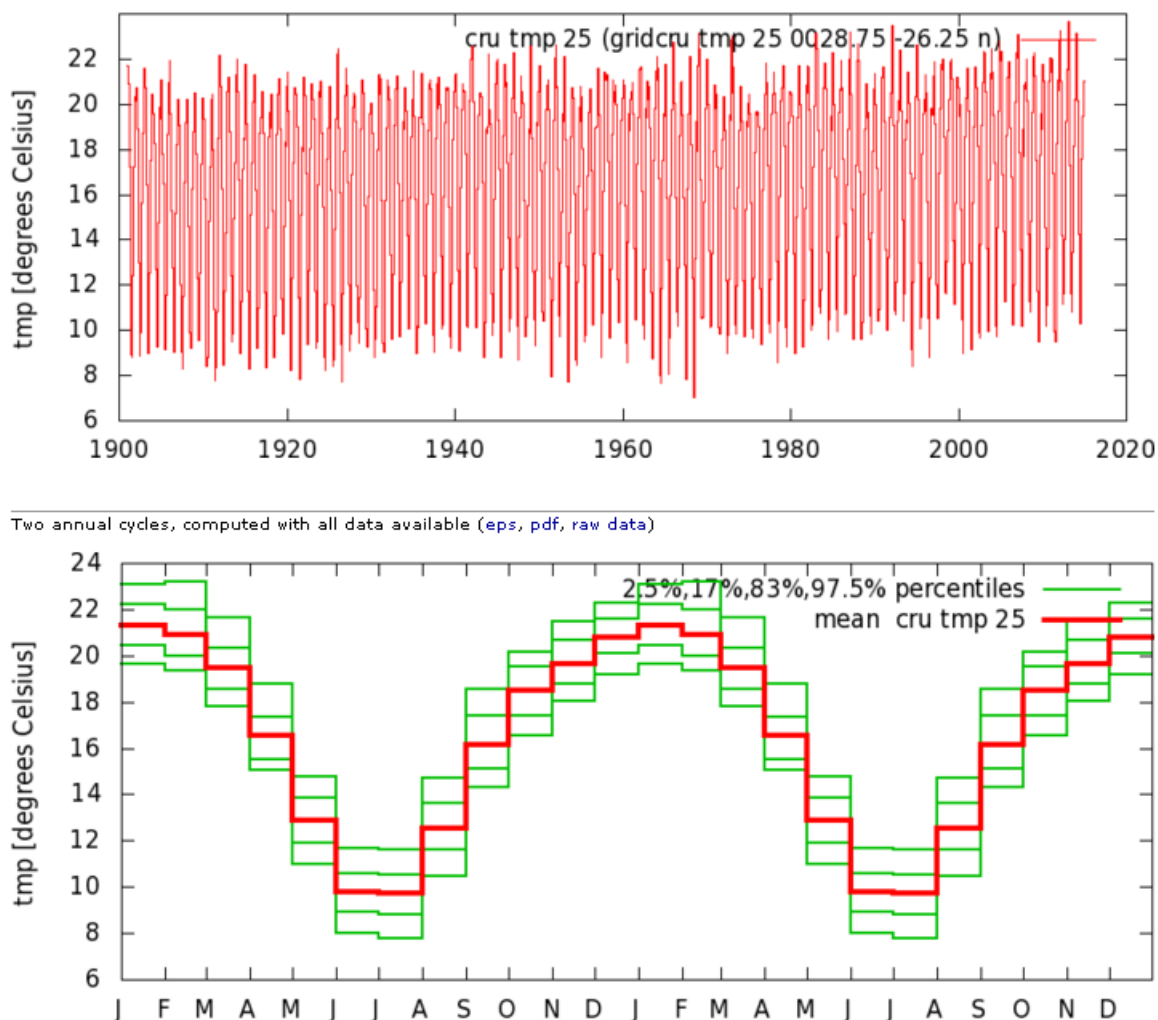


Рисунок 2.7. Хронологический график хода ежемесячной температуры

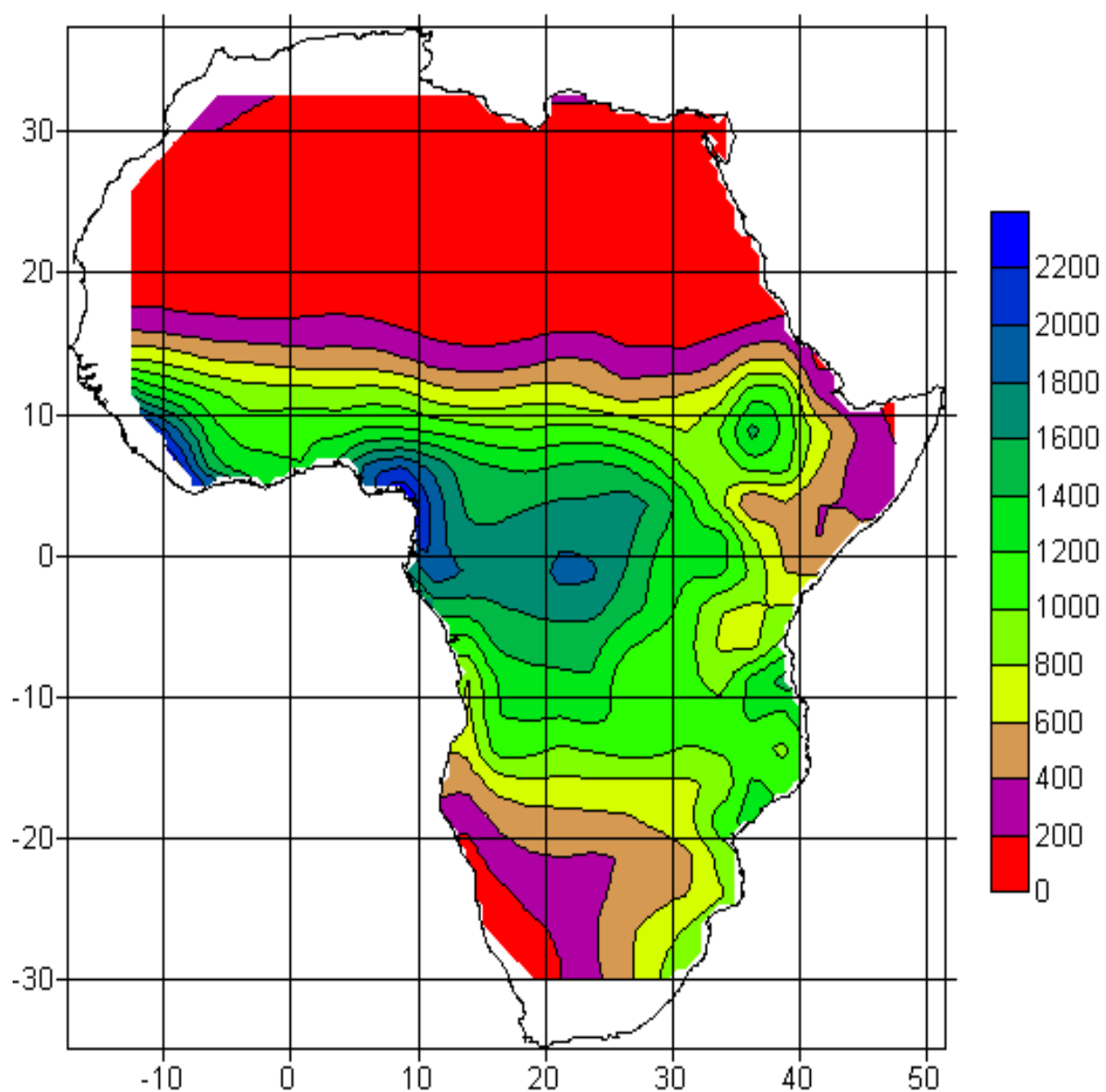


Рисунок 2.8. Карта среднегоголетних годовых сумм осадков
за период 1966 – 2014 гг.

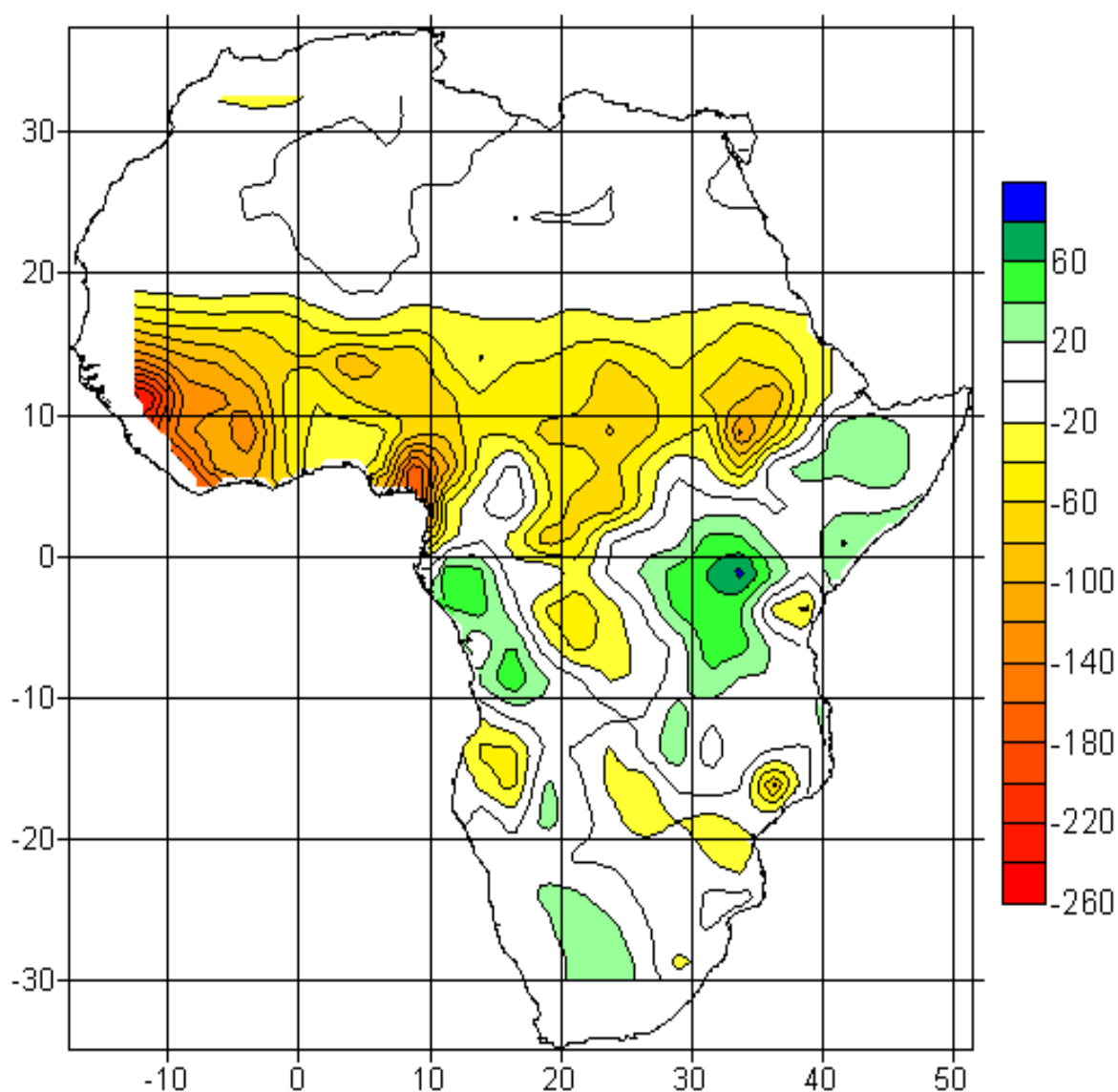
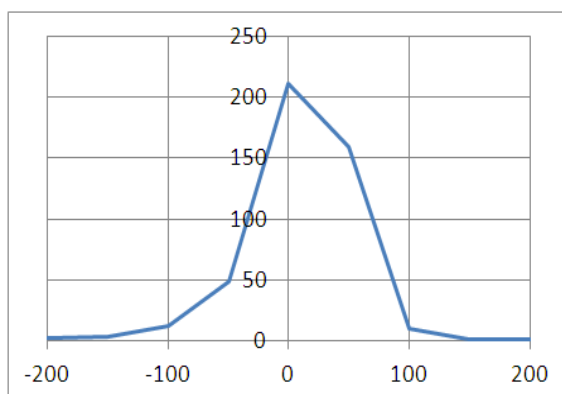


Рисунок 2.9. Карта изменений осадков от периода 1901 – 1965 к периоду 1966 – 2014 гг.

На основе данных, рассчитанных в узлах расчетной сетки, температуры и осадков построены гистограммы частоты повторяемости абсолютных изменений стока и осадков, которые представлены на рисунке 2.10.1, а относительных (в %) изменений – на рисунке 2.10.2.

А)



Б)

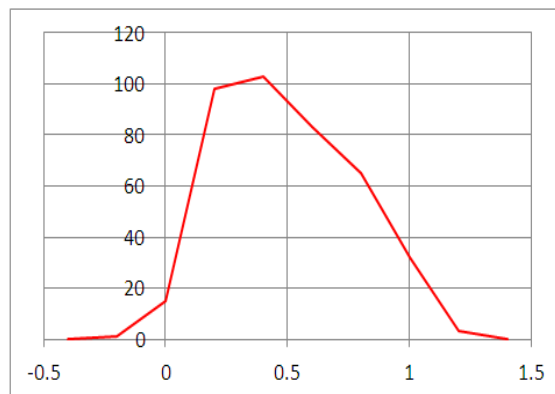


Рисунок 2.10.1 Частота повторяемости изменений осадков (А) и приземной температуры (Б) от периода 1901 – 1965 к периоду 1966 – 2014 гг.



Рисунок 2.10.2 Частота повторяемости относительных (в %) изменений осадков (А) и приземной температуры (Б) от периода 1901 – 1965 к периоду 1966 – 2014 гг.

2.3 Расчет испарения и испаряемости, дефицита и избытка водных ресурсов рек

По рядам осадков и температуры по формуле Тюрка для указанных периодов выполнен расчет средних многолетних значений испарения и испаряемости, представленных на картах на рисунках 2.11 – 2.14.

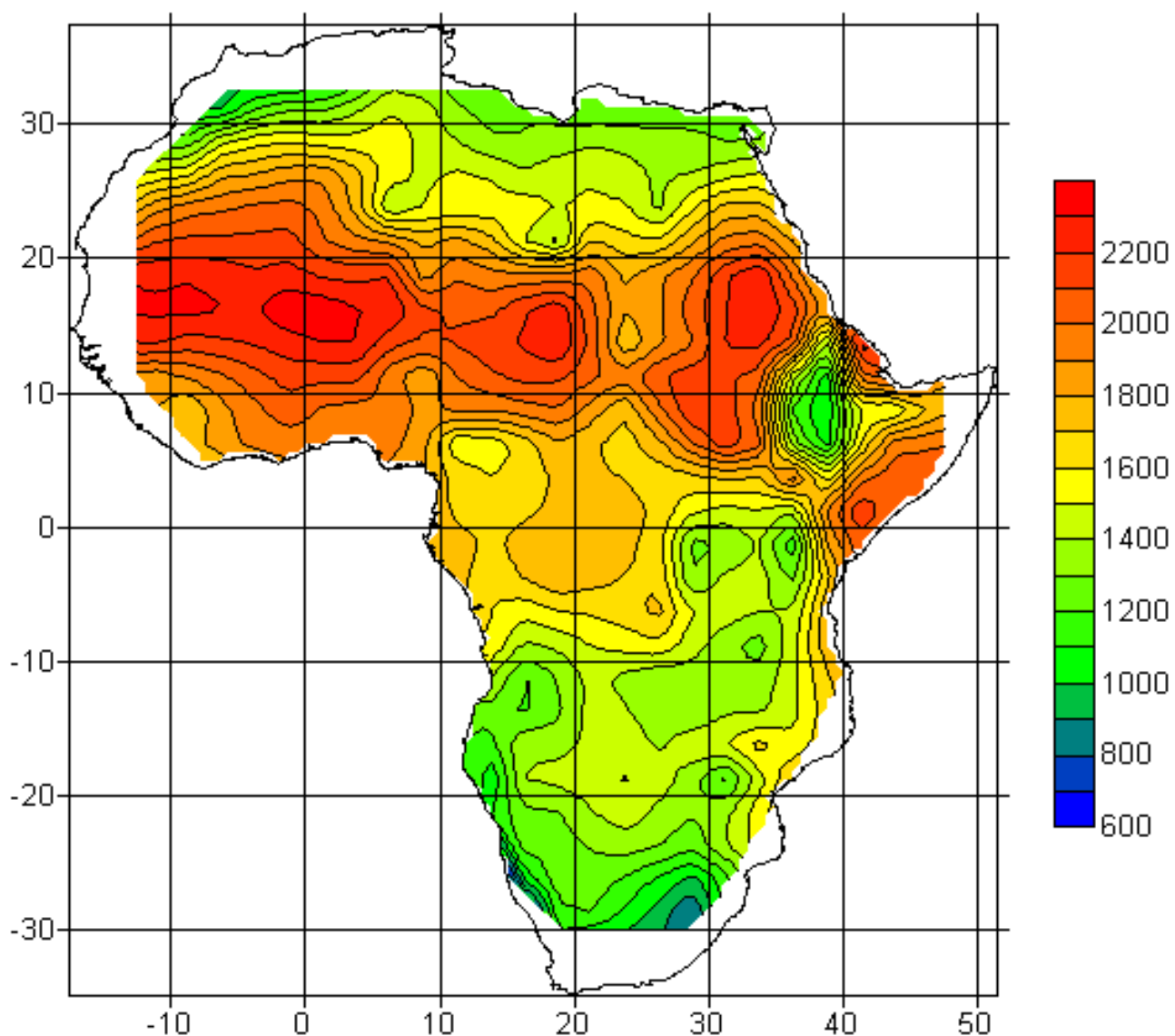


Рисунок 2.11 Карта среднемноголетней испаряемости (E_o) за период 1966 – 2014 гг.

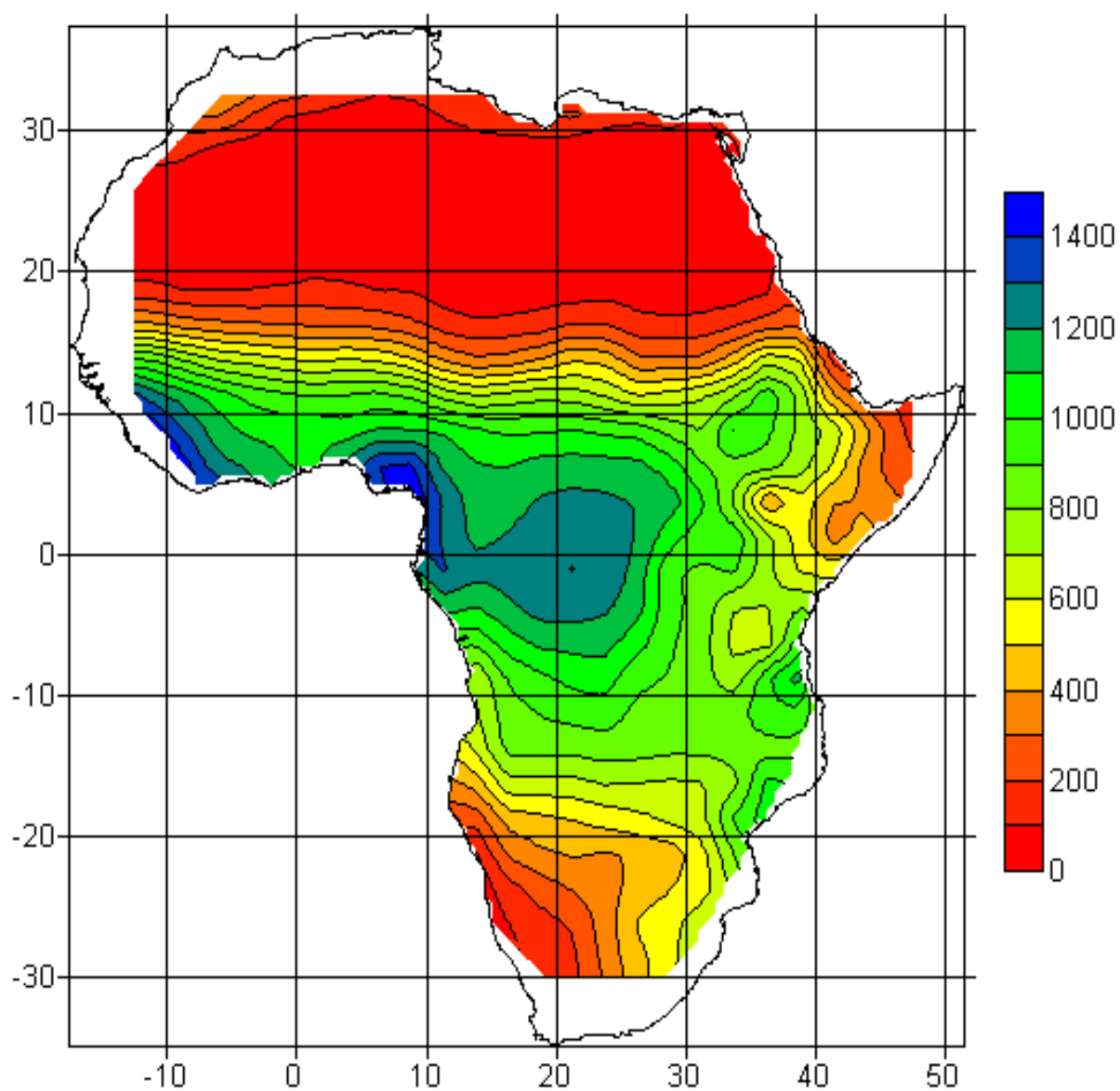


Рисунок 2.12 Карта среднемноголетнего испарения (E)
за период 1966 – 2014 гг.

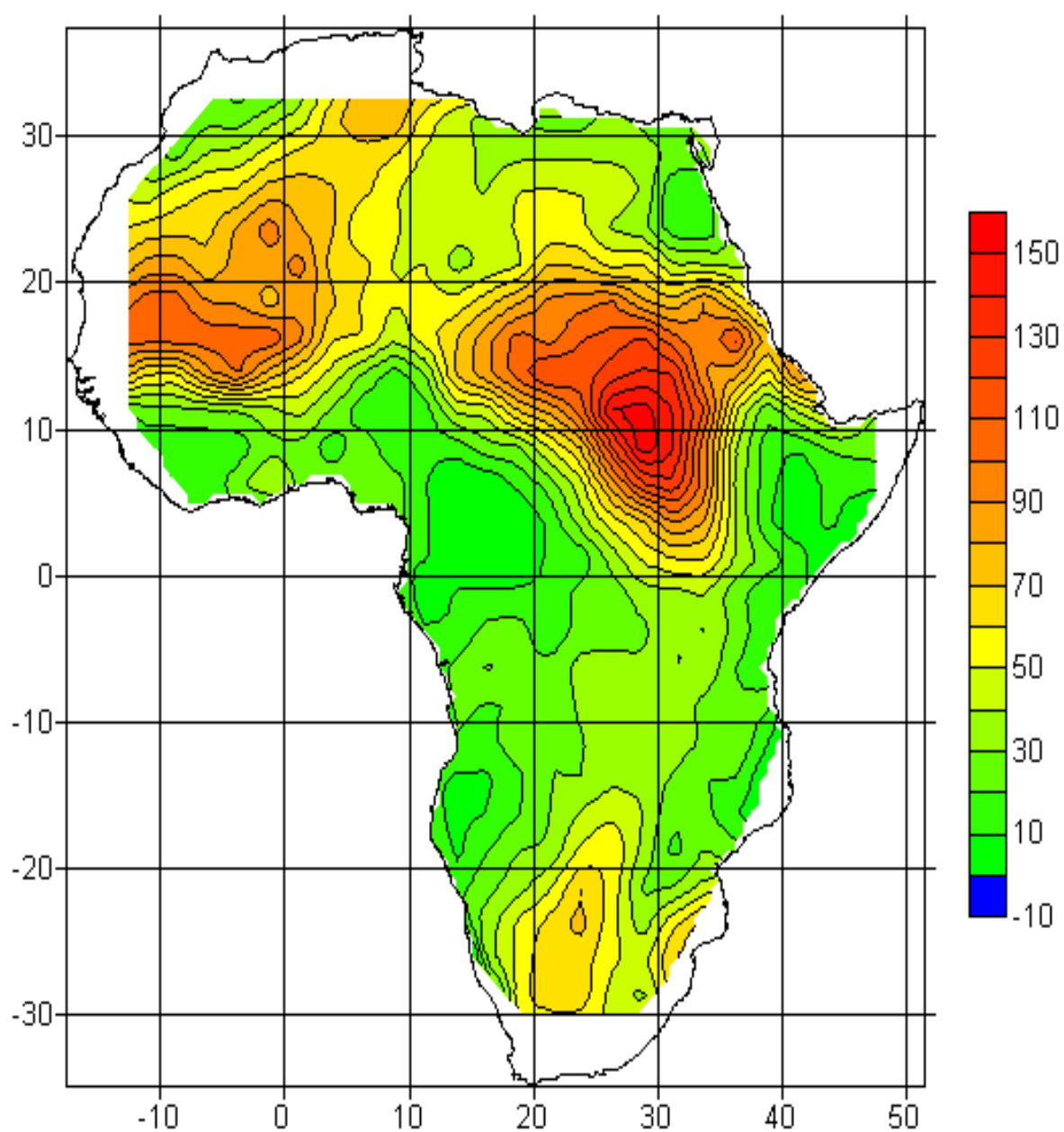


Рисунок 2.13 Карта изменений испаряемости от периода 1901 – 1965 к периоду 1966 – 2014 гг.

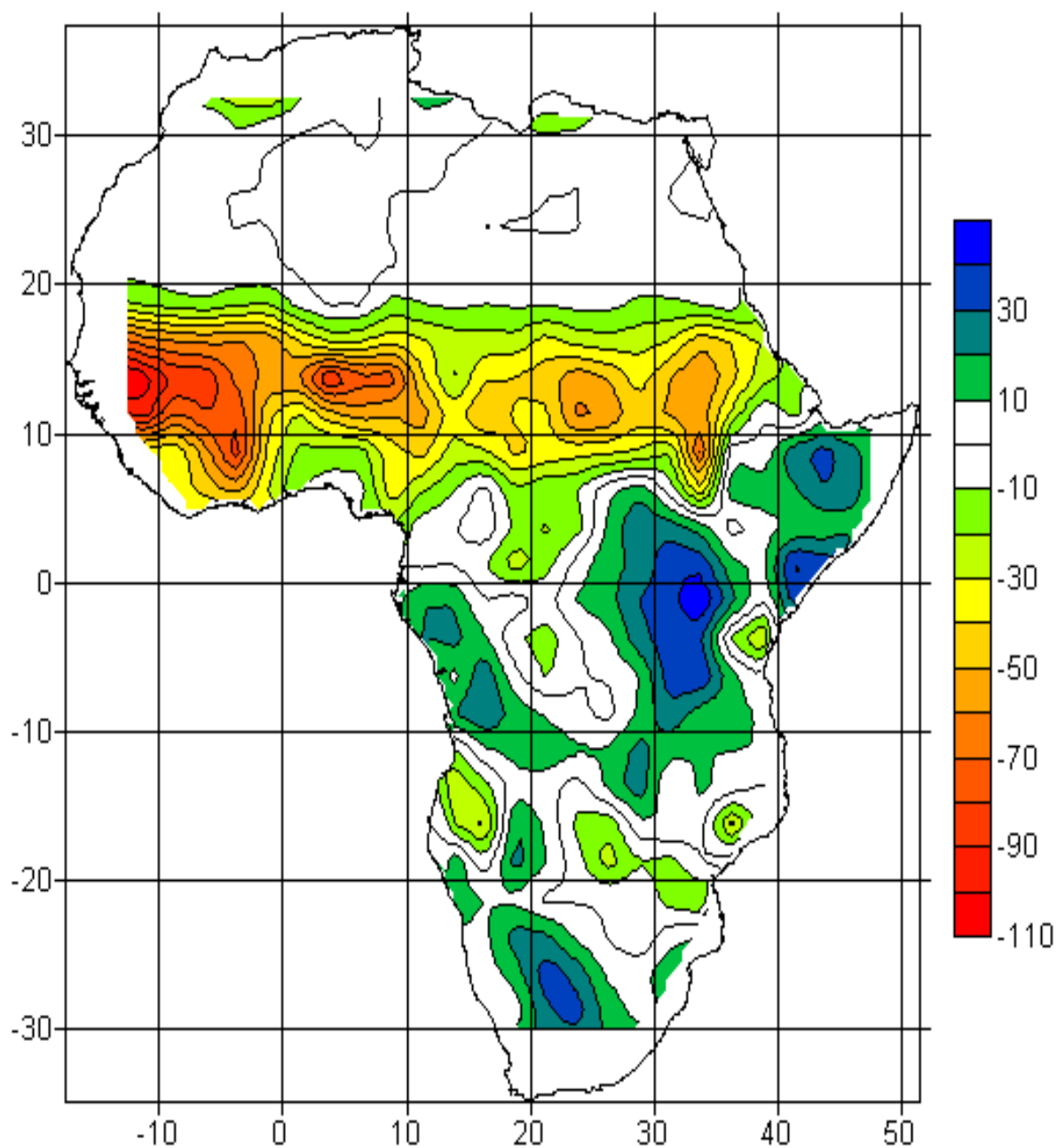


Рисунок 2.14 Карта изменений испарения от периода 1901 – 1965
к периоду 1966 – 2014 гг.

На основании данных карт фактических значений за периоды выполнен расчет и закартирован дефицита и избытка водных ресурсов речного стока для текущего климата (период с 1966 по 2014 гг.) (см. рисунки 2.15 и 2.16).

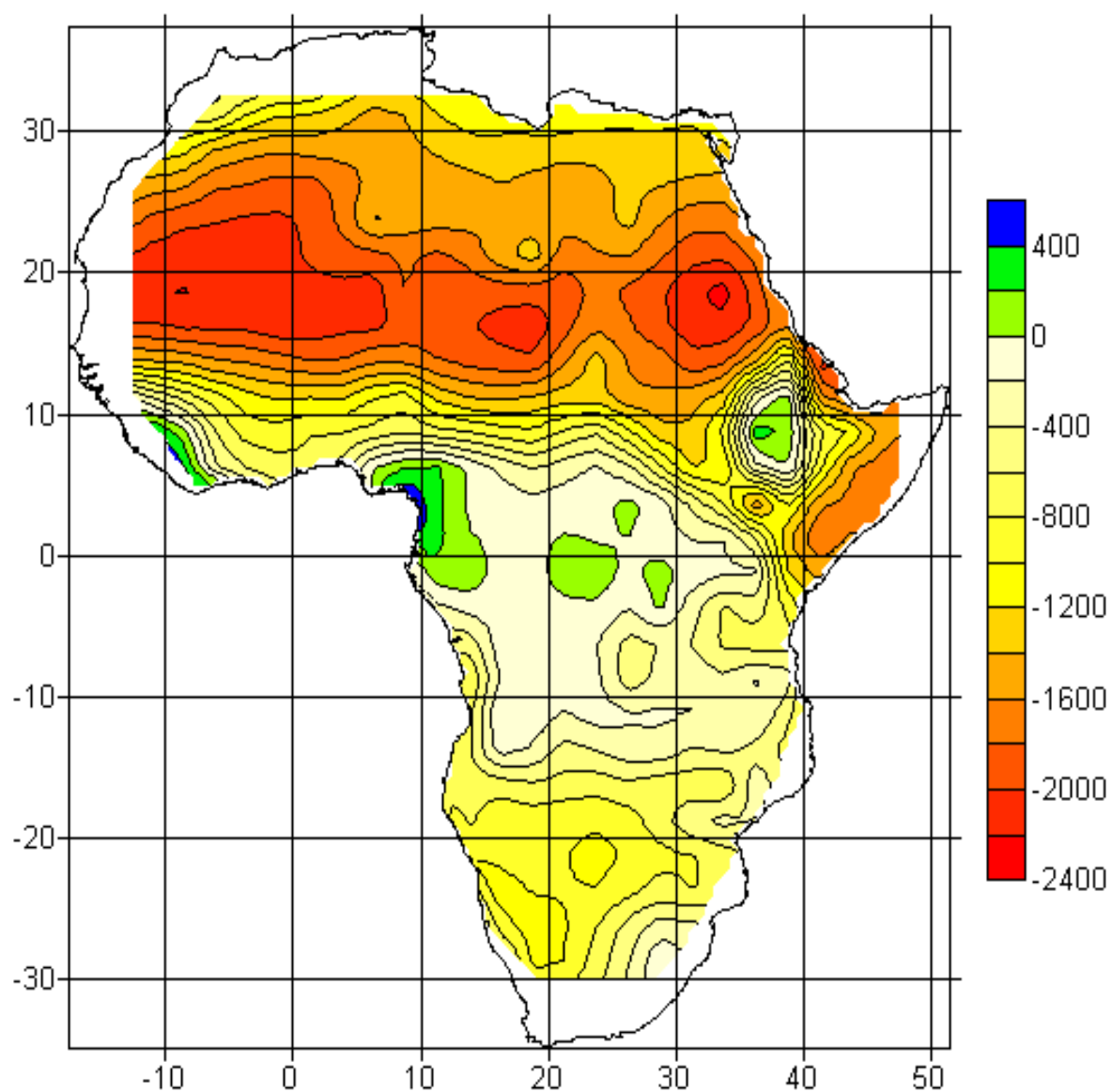


Рисунок 2.15 Карта среднегогодового избытка и дефицита водных ресурсов рек за период 1966 – 2014 гг.

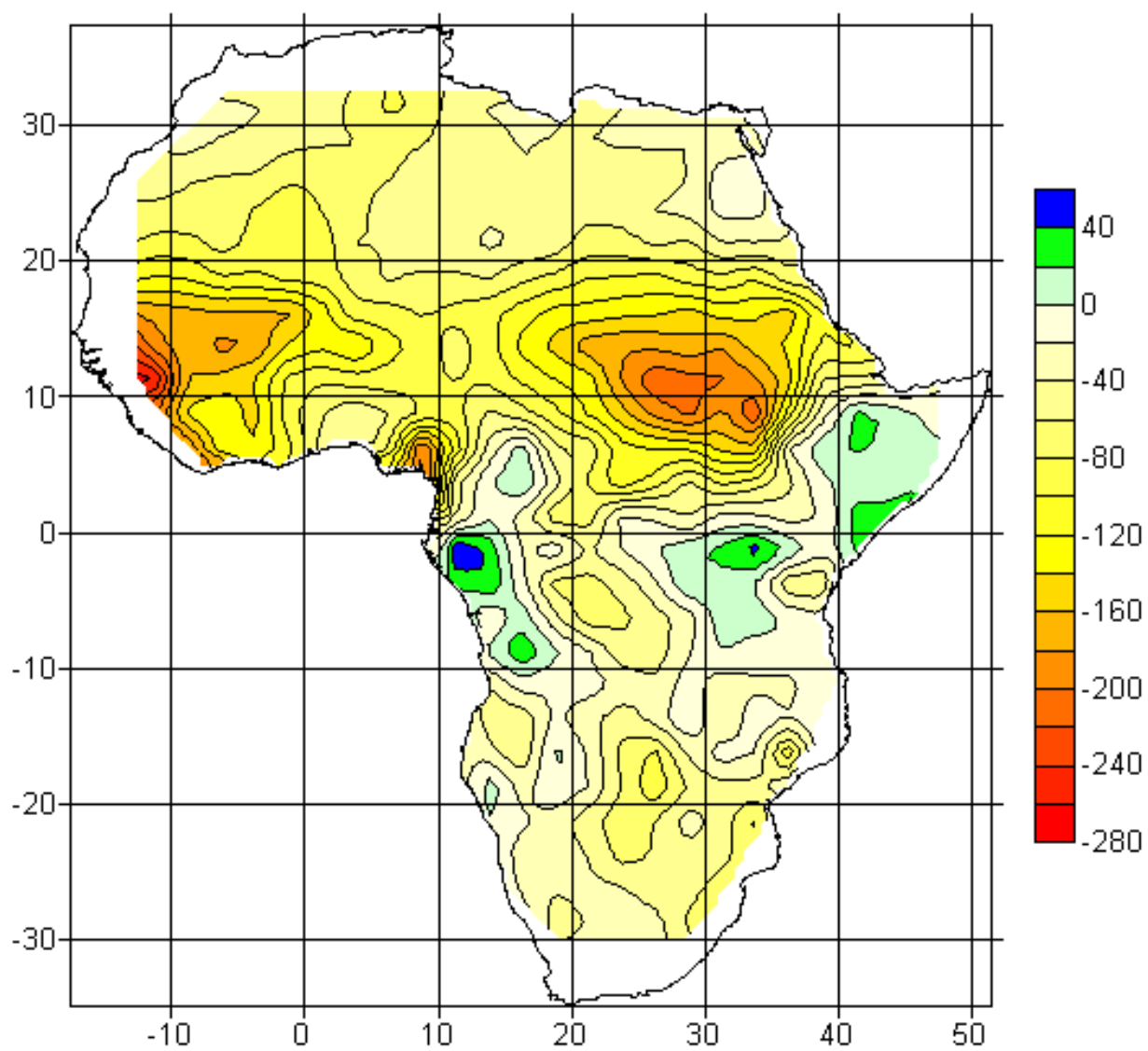


Рисунок 2.16 Карта изменений избытка и дефицита водных ресурсов рек от периода 1901 – 1965 к периоду 1966 – 2014 гг.

Математический аппарат

3.1 Статистические параметры

Статистические параметры, характеризующие вероятностную информацию, в качестве которых берутся обычно математическое ожидание и дисперсия, находятся либо графическим способом, либо с помощью вычислений.

Статистические параметры качества - среднее арифметическое, среднее квадратическое отклонение и размах вариаций - определяют фактический характер распределения и величину поля рассеивания.

Статистические параметры гидрологической системы отображаются на графике и могут использоваться в редакторе формул для кода исходной климатической системы и экспорта в коды прочих систем, условий, индикаторов и пользовательских переменных. Если гидрологическая система параметризована (параметры системы заданы в виде переменных), то пользователь может изменить их через традиционное меню Modify... Аналогично задается историческая выборка данных для тестирования.

Статистические параметры нестационарных случайных сигналов зависят от времени, что в значительной мере затрудняет и усложняет их анализ.

Важным статистическим параметром является среднеквадратичное значение флуктуации, которое при описании турбулентности часто называют интенсивностью.

3.2 Оценка рядов на однородность X , E , Y , T

Из-за возможных изменений климата конкретных территории, а также в результате вмешательства человека в природные процессы формирования стока могут измениться параметры распределения (среднее значение, коэффициенты, вариации и асимметрии) различных характеристик элементов водного баланса. В этих случаях данные наблюдений до и после таких изменений нельзя рассматривать как имеющиеся выборки, как выборки из единой генеральной совокупности. Об однородности или неоднородности рядов наблюдений судят в первую очередь на основе генетического (физического) анализа условий формирования и режима элементов водного баланса с учетом их изменений.

Однако получаемые на основе такого анализа результаты часто не позволяют с достаточной степенью уверенности утверждать, что масштабы изменений сказались на данных наблюдений. В этих случаях, для подкрепления полученных на основе физического анализа выводов, целесообразно использовать статистические методы оценки рядов наблюдений однородность.

Для объективной оценки характеристик элементов водного баланса необходимо проанализировать однородность их рядов наблюдений.

3.2.1 Критерий Стьюдента

Критерий позволяет найти вероятность того, что оба средних значения в выборке относятся к одной и той же совокупности. Данный критерий наиболее часто используется для проверки гипотезы: «Средние двух выборок относятся к одной и той же совокупности».

При использовании критерия можно выделить два случая. В первом случае его применяют для проверки гипотезы о равенстве генеральных средних

двух независимых, несвязанных выборок (так называемый двухвыборочный t-критерий). В этом случае есть контрольная группа и экспериментальная (опытная) группа, количество испытуемых в группах может быть различно.

Во втором случае, когда одна и та же группа объектов порождает числовой материал для проверки гипотез о средних, используется так называемый парный t-критерий. Выборки при этом называют *зависимыми, связанными*.

3.2.1.1 Случай независимых выборок

Статистика критерия для случая несвязанных, независимых выборок равна:

где $\bar{x}$, $\bar{y}$ — средние арифметические в экспериментальной и контрольной группах,

σ_{x-y} - стандартная ошибка разности средних арифметических. Находится из формулы:

$$\sigma_{x-y} = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2 + \sum(y_i - \bar{y})^2}{n_1 + n_2 - 2}} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \quad (2.3.1.2)$$

Где n_1 и n_2 соответственно величины первой и второй выборки.

Если $n_1=n_2$, то стандартная ошибка разности средних арифметических будет считаться по формуле:

$$\sigma_{x-y} = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2 + \sum(y_i - \bar{y})^2}{(n-1) \cdot n}} \quad (2.3.1.3)$$

где (n) величина выборки.

Подсчет *числа степеней свободы* осуществляется по формуле:

$$k = n_1 + n_2 - 2. \quad (2.3.1.4)$$

При численном равенстве выборок $k = 2n - 2$.

Далее необходимо сравнить полученное значение $t_{\text{эмп}}$ с теоретическим значением t —распределения Стьюдента (см. приложение к учебникам статистики). Если $t_{\text{эмп}} < t_{\text{крит}}$, то гипотеза H_0 принимается, в противном случае нулевая гипотеза отвергается и принимается альтернативная гипотеза.

Рассмотрим пример использования t-критерия Стьюдента для несвязных и неравных по численности выборок.

Сравниваем полученное в эксперименте значение t с табличным значением с учетом степеней свободы, равных по формуле (4) числу испытуемых минус два .

Табличное значение $t_{\text{крит}}$ равняется 2,1 при допущении возможности риска сделать ошибочное суждение в пяти случаях из ста (уровень значимости=5 % или 0,05).

Если полученное в эксперименте эмпирическое значение t превышает табличное, то есть основания принять альтернативную гипотезу (H_1) о том, что учащиеся экспериментальной группы показывают в среднем более высокий уровень знаний. В эксперименте $t=3,981$, табличное $t=2,10$, $3,981 > 2,10$, откуда следует вывод о преимуществе экспериментального обучения.

3.2.1.2 Случай связанных (парных) выборок

В случае связанных выборок с равным числом измерений в каждой можно использовать более простую формулу t-критерия Стьюдента.

Вычисление значения t осуществляется по формуле:

$$t_{\text{эмп}} = d / Sd \quad ((2.3.1.5))$$

где $d_i = x_i - y_i$ — разности между соответствующими значениями переменной X и переменной Y, а d - среднее этих разностей; Sd вычисляется по следующей формуле:

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum d_i^2 - \frac{(\sum d_i)^2}{n}}{n \cdot (n - 1)}} \quad (2.3.1.6)$$

Число степеней свободы k определяется по формуле $k=n-1$. Рассмотрим пример использования t-критерия Стьюдента для связанных и, очевидно, равных по численности выборок.

Если $t_{\text{эмп}} < t_{\text{крит}}$, то нулевая гипотеза принимается, в противном случае принимается альтернативная.

3.2.1.3 Непараметрические критерии

Сравнивая на глазок (по процентным соотношениям) результаты до и после какого-либо воздействия, исследователь приходит к заключению, что если наблюдаются различия, то имеет место различие в сравниваемых выборках. Подобный подход категорически неприемлем, так как для процентов нельзя определить уровень достоверности в различиях. Проценты, взятые сами по себе, не дают возможности делать статистически достоверные выводы. Чтобы доказать эффективность какого-либо воздействия, необходимо выявить статистически значимую тенденцию в смещении (сдвиге) показателей. Для решения подобных задач исследователь может использовать ряд критериев различия. Ниже будут рассмотрены непараметрические критерии: критерий знаков и критерий хи-квадрат.

2.3.2 Критерий Фешера

она позволяет сравнивать величины выборочных дисперсий двух независимых выборок. Для вычисления $F_{\text{эмп}}$ нужно найти отношение дисперсий двух выборок, причем так, чтобы большая по величине дисперсия находилась бы в числителе, а меньшая – в знаменателе. Формула вычисления критерия Фишера такова:

где σ_x^2 , σ_y^2 - дисперсии первой и второй выборки соответственно.

Так как, согласно условию критерия, величина числителя должна быть больше или равна величине знаменателя, то значение $F_{\text{эмп}}$ всегда будет больше или равно единице. Число степеней свободы определяется также просто:

$k_1 = n_1 - 1$ для первой выборки (т.е. для той выборки, величина дисперсии которой больше) и $k_2 = n_2 - 1$ для второй выборки.

В Приложении 1 критические значения критерия Фишера находятся по величинам k_1 (верхняя строчка таблицы) и k_2 (левый столбец таблицы).

Если $t_{\text{эмп}} > t_{\text{крит}}$, то нулевая гипотеза принимается, в противном случае принимается альтернативная.

По таблице из Приложения 1 для F критерия при степенях свободы в обоих случаях равных $k=10 - 1 = 9$ находим $F_{\text{крит}}=3,18 (<3.29)$, следовательно, в терминах статистических гипотез можно утверждать, что H_0 (гипотеза о сходстве) может быть отвергнута на уровне 5%, а принимается в этом случае гипотеза H_1 . Исследователь может утверждать, что по степени однородности такого показателя, как умственное развитие, имеется различие между выборками из двух классов.

2.3.3 Числовые характеристики случайных величин, их роль и назначение

В данной главе мы познакомились с рядом полных, исчерпывающих характеристик случайных величин – так называемых законов распределения. Такими характеристиками были:

для дискретной случайной величины:

- функция распределения;
- ряд распределения (графически – многоугольник распределения);

для непрерывной случайной величины:

- функция распределения;
- плотность распределения (графически – кривая распределения).

Каждый закон распределения представляет собой некоторую функцию, и указание этой функции полностью описывает случайную величину с вероятностной точки зрения.

Однако во многих вопросах практики нет необходимости характеризовать случайную величину полностью, исчерпывающим образом. Зачастую достаточно бывает указать только отдельные числовые параметры, до некоторой степени характеризующие существенные черты распределения случайной величины; какое-либо число, характеризующее степень разбросанности этих значений относительно среднего, и т.д. пользуясь такими характеристиками, мы хотим все существенные сведения относительно случайной величины, которыми мы располагаем, выразить наиболее компактно с помощью минимального числа числовых параметров. Такие характеристики, назначение которых – выразить в сжатой форме наиболее существенные особенности распределения, называют числовыми характеристиками случайной величины.

В теории вероятностей числовые характеристики и операции с ними играют огромную роль. С помощью числовых характеристик существенно удается

решить задачу до конца, оставляя в стороне законы распределения и оперируя одними числовыми характеристиками.

При этом весьма важную роль играет то обстоятельство, что когда в задаче фигурирует большое количество случайных величин, каждая из которых оказывает известное влияние на численный результат опыта, то закон распределения этого результата в значительной мере можно считать независимым от законов распределения отдельных случайных величин (возникает так называемый нормальный закон распределения). В этих случаях по существу задачи для исчерпывающего суждения о результирующем законе распределения не требуется знать законов распределения отдельных случайных величин, фигурирующих в задаче; достаточно знать лишь некоторые числовые характеристики этих величин.

В теории вероятностей и математической статистике применяется большое количество различных числовых характеристик, имеющих различное назначение и различные области применения. Из них в настоящем курсе мы введем только некоторые, наиболее часто применяемые.

3.3.1 Характеристики положения (математическое ожидание, мода, медиана)

Среди числовых характеристик случайных величин нужно, прежде всего, отметить те, которые характеризуют положение случайной величины на числовой оси, т.е. указывают некоторое среднее, ориентировочное значение, около которого группируются все возможные значения случайной величины.

Среднее значение случайной величины есть некоторое число, являющееся как бы её «представителем» и заменяющее её при грубо ориентировочных расчетах. Когда мы говорим: «среднее время работы лампы равно 100 часам» или «средняя точка попадания смещена относительно цели на 2 м вправо», мы этим указываем определенную числовую характеристику случайной величины,

описывающую её местоположение на числовой оси, т.е. «характеристику положения». Из характеристик положения в теории вероятностей важнейшую роль играет математическое ожидание случайной величины, которое иногда называют просто средним значением случайной величины.

Рассмотрим дискретную случайную величину X , имеющую возможные значения $x_1, x_2, \dots, x_n$ с вероятностями $p_1, p_2, \dots, p_n$. Нам требуется охарактеризовать каким-то числом положение значений случайной величины на оси абсцисс с учетом того, что эти значения имеют различные вероятности. Для этой цели естественно воспользоваться так называемым «средним взвешенным» из значений x_i , причем каждое значение x_i при осреднении должно учитываться с «весом», пропорциональным вероятности этого значения. Таким образом, мы вычислим среднее случайной величины X , которое мы обозначим $M[X]$:

$$M[X] = \frac{x_1 p_1 + x_2 p_2 + \dots + x_n p_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (3.3.1.1)$$

$$\text{или, учитывая, что } \sum_{i=1}^n p_i = 1, \quad M[X] = \sum_{i=1}^n x_i p_i \quad (3.3.1.2)$$

Это среднее взвешенное значение и называется математическим ожиданием случайной величины. Таким образом, мы ввели в рассмотрение одно из важнейших понятий теории вероятностей понятие математического ожидания.

Математическим ожиданием случайной величины называется сумма произведений всех возможных значений случайной величины на вероятности этих значений. Заметим, что в вышеприведенной формулировке определение математического ожидания справедливо, строго говоря, только для дискретных случайных величин; ниже будет дано обобщение этого понятия на случай непрерывных величин. Для того, чтобы сделать понятие математического ожидания более наглядным, обратимся к механической интерпретации

распределения дискретной случайной величины. Пусть на оси абсцисс расположены точки с абсциссами $x_1, x_2, \dots, x_n$, в которых сосредоточены

соответственно массы $p_1, p_2, \dots, p_n$, причем $\sum_{i=1}^n p_i = 1$.

Тогда, очевидно, математическое ожидание $M[X]$, определяемое формулой (3.3.1.1), есть не что иное, как абсцисса центра тяжести данной системы материальных точек.

Математическое ожидание случайной величины X связано своеобразной зависимостью со средним арифметическим наблюдаемых значений случайной величины при большом числе опытов. Эта зависимость того же типа, как зависимость между частотой и вероятностью, а именно: при большом числе опытов среднее арифметическое наблюдаемых значений случайной величины приближается (сходится по вероятности) к ее математическому ожиданию. Из наличия связи между частотой и вероятностью можно вывести как следствие наличие подобной же связи между средним арифметическим и математическим ожиданием.

Действительно, рассмотрим дискретную случайную величину X , характеризуемую рядом распределения:

x_i	x_1	x_2	$\dots$	x_n
p_i	p_1	p_2	$\dots$	p_n

где $p_i = P(X = x_i)$. Пусть производится N независимых опытов, в каждом из которых величина X принимает определенное значение. Предположим, что значение x_1 появилось m_1 раз, значение x_2 появилось m_2 раз, вообще

значение x_i появилось m_i раз. Очевидно, $\sum_{i=1}^n m_i = N$. Вычислим среднее арифметическое наблюдаемых значений величины X , которое, в отличие от математического ожидания $M[X]$ мы обозначим $M^*[X]$:

(3.3.1.3)

Но $\frac{m_i}{N}$ есть не что иное, как частота (или статистическая вероятность) события $X = x_i$; эту частоту можно обозначить p_i^* . Тогда $M^*[X] = \sum_{i=1}^n x_i p_i^*$, т.е. среднее арифметическое наблюдаемых значений случайной величины равно сумме произведений всех возможных значений случайной величины на частоты этих значений. При увеличении числа опытов N частоты p_i^* будут приближаться (сходиться по вероятности) к соответствующим вероятностям p_i .

Следовательно, и среднее арифметическое наблюдаемых значений случайной величины $M^*[X]$ при увеличении числа опытов будет приближаться (сходиться по вероятности) к её математическому ожиданию $M[X]$. Сформулированная выше связь между средним арифметическим и математическим ожиданием составляет содержание одной из форм закона больших чисел. Мы уже знаем, что все формы закона больших чисел констатируют факт устойчивости некоторых средних при большом числе опытов. Здесь речь идет об устойчивости среднего арифметического из ряда наблюдений

одной и той же величины. При небольшом числе опытов среднее арифметическое их результатов случайно; при достаточном увеличении числа опытов оно становится «почти не случайным» и, стабилизируясь, приближается к постоянной величине – математическому ожиданию.

Свойство устойчивости средних при большом числе опытов легко проверить экспериментально. Например, взвешивая какое-либо тело в лаборатории на точных весах, мы в результате взвешивания получаем каждый раз новое значение; чтобы уменьшить ошибку наблюдения, мы взвешиваем тело несколько раз и пользуемся средним арифметическим полученных значений. Легко убедиться, что при дальнейшем увеличении числа опытов (взвешиваний) среднее арифметическое реагирует на это увеличение все меньше и меньше и при достаточно большом числе опытов практически перестает меняться.

Формула (3.3.1.3) для математического ожидания соответствует случаю дискретной случайной величины. Для непрерывной величины X математическое ожидание, естественно, выражается уже не суммой, а интегралом:

$$M[X] = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx, \quad (3.3.1.4)$$

где $f(x)$ - плотность распределения величины X .

Формула (3.3.1.4) получается из формулы (3.3.1.3), если в ней заменить отдельные значения x_i непрерывно изменяющимся параметром x , соответствующие вероятности P_i - элементом вероятности $f(x)dx$, конечную сумму – интегралом. В дальнейшем мы часто будем пользоваться таким способом распространения формул, выведенных для прерывных величин, на случай непрерывных величин.

В механической интерпретации математическое ожидание непрерывной случайной величины сохраняет тот же смысл – абсцисса центра тяжести в случае, когда масса распределена по оси абсцисс непрерывно, с плотностью $f(x)$. Эта

интерпретация часто позволяет найти математическое ожидание без вычисления интеграла (3.3.1.4) из простых механических соображений. Выше мы ввели обозначение $M[X]$ для математического ожидания величины X . В ряде случаев, когда величина $M[X]$ входит в формулы как определенное число, её удобнее обозначать одной буквой. В этих случаях мы будем обозначать математическое ожидание величины X через m_x :

$$m_x = M[X] \quad (3.3.1.5)$$

Обозначения m_x и $M[X]$ для математического ожидания будут в дальнейшем применяться параллельно в зависимости от удобства той или иной записи формул. Условимся также в случае надобности сокращать слова «математическое ожидание» буквами «М.О.»

Следует заметить, что важнейшая характеристика положения – математическое ожидание – существует не для всех случайных величин. Можно составить примеры таких случайных величин, для которых математического ожидания не существует, так как соответствующая сумма или интеграл расходятся.

Рассмотрим, например, прерывную случайную величину X с рядом распределения:

x_l	2	2^2	$\dots$	2^l	$\dots$
p_l	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2^2}$	$\dots$	$\frac{1}{2^l}$	$\dots$

Нетрудно убедиться в том, что $\sum_{i=1}^n p_i = 1$, т.е. ряд распределения имеет смысл;

однако сумма $\sum_{i=1}^{\infty} x_i p_i$ в данном случае расходится и, следовательно,

математического ожидания величины X не существует. Однако для практики такие случаи существенного интереса не представляют. Обычно случайные величины, с которыми мы имеем дело, имеют ограниченную область возможных значений и, безусловно, обладают математическим ожиданием. Выше мы дали формулы (3.3.1.3) и (3.3.1.4)), выражающие математическое ожидание соответственно для прерывной и непрерывной случайной величины X .

Если величина X принадлежит к величинам смешанного типа, то её математическое ожидание выражается формулой вида:

$$M[X] = \sum_i x_i p_i + \int x f'(x) dx, \quad (3.3.1.6)$$

где сумма распространяется на все точки x_i , в которых функция распределения терпит разрыв, а интеграл – на все участки, на которых функция распределения непрерывна. Кроме важнейшей из характеристик положения – математического ожидания, - на практике иногда применяются и другие характеристики положения, в частности, мода и медиана случайной величины.

Модой случайной величины называется её наиболее вероятное значение. Термин «наиболее вероятное значение», строго говоря, применим только к прерывным величинам; для непрерывной величины модой является то значение, в котором плотность вероятности максимальна.

Условимся обозначать моду буквой M . На рис. 3.3.1 и 3.3.2 показана мода соответственно для прерывной и непрерывной случайных величин.

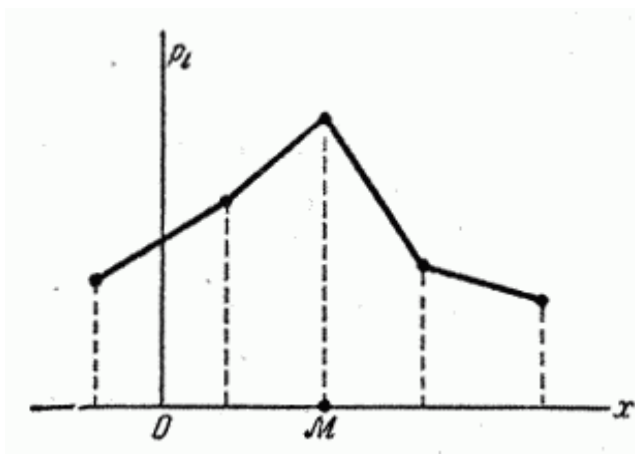


Рис. 3.3.1

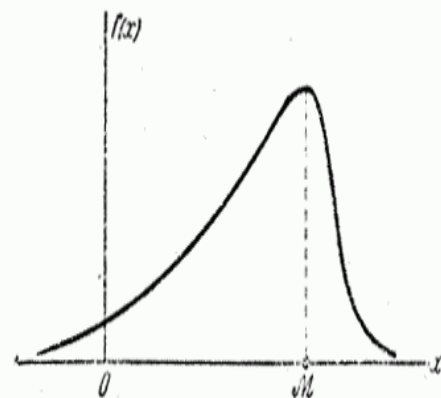


Рис. 3.3.2.

Если многоугольник распределения (кривая распределения) имеет более одного максимума, распределение называется «полимодальным» (рис. 3.3.3 и 3.3.4).

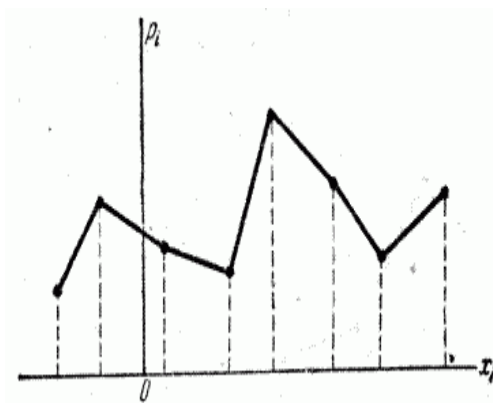


Рис. 3.3.3.

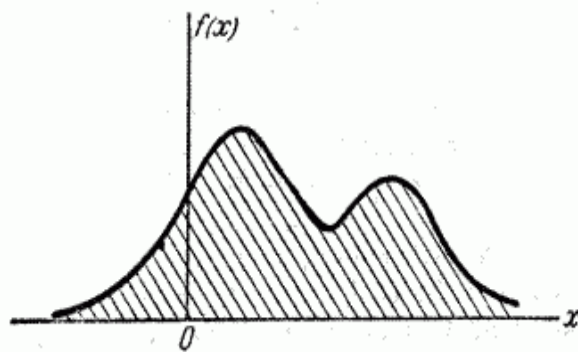


Рис. 3.3.4.

Иногда встречаются распределения, обладающие посередине не максимумом, а минимумом (рис. 3.5 и 3.6). Такие распределения называют «анти модальным». Примером анти модального распределения может служить распределение, полученное в примере 5, п° 5.1.

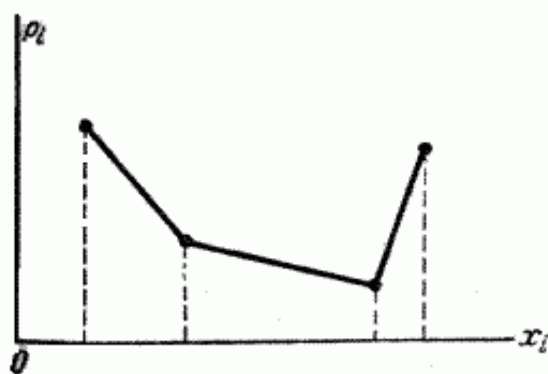


Рис. 3.3.5.

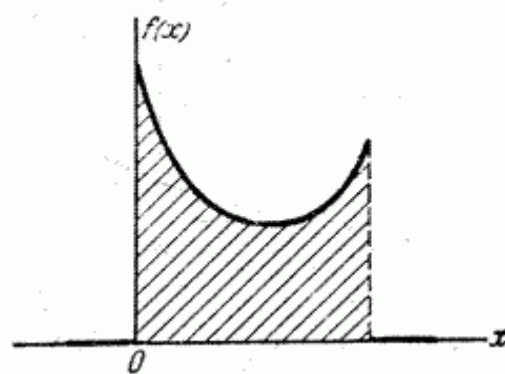


Рис. 3.3.6.

В общем случае мода и математическое ожидание случайной величины не совпадают. В частном случае, когда распределение является симметричным и модальным (т.е. имеет моду) и существует математическое ожидание, то оно совпадает с модой и центром симметрии распределения.

Часто применяется еще одна характеристика положения – так называемая медиана случайной величины. Этой характеристикой пользуются обычно только для непрерывных случайных величин, хотя формально можно её определить и для прерывной величины.

Медианой случайной величины называется такое её значение , для

которого т.е. одинаково вероятно, окажется

ли случайная величина меньше или больше . Геометрически медиана – это абсцисса точки, в которой площадь, ограниченная кривой распределения, делится пополам (рис. 3.3.7).

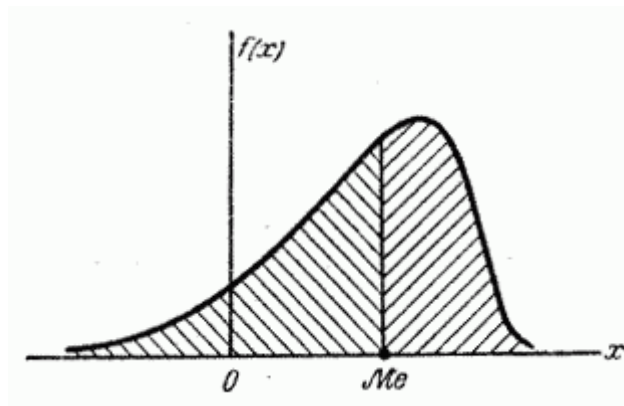


Рис. 3.3.7.

В случае симметричного модального распределения медиана совпадает с математическим ожиданием и модой.

3.3.2. Моменты. Дисперсия. Среднее квадратичное отклонение

Кроме характеристик положения – средних, типичных значений случайной величины, - употребляется еще ряд характеристик, каждая из которых описывает то или иное свойство распределения. В качестве таких характеристик чаще всего применяются так называемые моменты. Понятие момента широко применяется в механике для описания распределения масс (статические моменты, моменты инерции и т.д.).

Совершенно теми же приемами пользуются в теории вероятностей для описания основных свойств распределения случайной величины. Чаще всего применяются на практике моменты двух видов: начальные и центральные.

Начальным моментом s -го порядка прерывной случайной величины X называется сумма вида:

$$\alpha_s [X] = \sum_{i=1}^n x_i^s p_i. \quad (3.2.4.1)$$

Очевидно, это определение совпадает с определением начального момента порядка s в механике, если на оси абсцисс в точках $x_1, x_2, \dots, x_n$ сосредоточены массы $p_1, p_2, \dots, p_n$.

Для непрерывной случайной величины X начальным моментом s -го порядка называется интеграл

$$\alpha_s[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x^s f(x) dx. \quad (3.2.4.2)$$

Нетрудно убедиться, что введенная в предыдущем п^о основная характеристика положения – математическое ожидание – представляет собой не что иное, как первый начальный момент случайной величины X .

Пользуясь знаком математического ожидания, можно объединить две формулы (4.1) и (4.2) в одну. Действительно, формулы (4.1) и (4.2) по структуре полностью аналогичны формулам (4.1) и (4.2), с той разницей, что в них вместо x_i и x стоят, соответственно, x_i^s и x^s . Поэтому можно написать общее определение начального момента s -го порядка, справедливое как для прерывных, так и для непрерывных величин:

$$\alpha_s[X] = M[X^s], \quad (3.2.4.3)$$

т.е. начальным моментом s -го порядка случайной величины X называется математическое ожидание s -й степени этой случайной величины. Перед тем, как дать определение центрального момента, введем новое понятие «центрированной случайной величины».

Пусть имеется случайная величина X с математическим ожиданием m_x . Центрированной случайной величиной, соответствующей величине X , называется отклонение случайной величины X от её математического ожидания:

$$X = X - m_x. \quad (3.2.4.4)$$

Условимся в дальнейшем везде обозначать центрированную случайную величину, соответствующую данной случайной величине, той же буквой со значком (°) наверху. Не трудно

убедиться, что математическое ожидание центрированной случайной величины равно нулю. Действительно, для прерывной величины

$$M[\overset{\circ}{X}] = M[X - m_x] = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x) p_i = \sum_{i=1}^n x_i p_i - m_x \sum_{i=1}^n p_i = m_x - m_x = 0 ; \quad (3.2.4.5)$$

аналогично и для непрерывной величины.

Центрирование случайной величины, очевидно, равносильно переносу начала координат в среднюю, «центральную» точку, абсцисса которой равна математическому ожиданию. Моменты центрированной случайной величины носят название центральных моментов. Они аналогичны моментам относительно центра тяжести в механике.

Таким образом, центральным моментом порядка s случайной величины X называется математическое ожидание s -й степени соответствующей центрированной случайной величины:

$$\mu_s[X] = M[\overset{\circ}{X^s}] = M[(X - m_x)^s], \quad (3.2.4.6)$$

а для непрерывной – интегралом

$$\mu_s[X] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^s f(x) dx. \quad (3.2.4.8)$$

В дальнейшем в тех случаях, когда не возникает сомнений, к какой случайной величине относится данный момент, мы будем для краткости в место $\alpha_s[X]$ и $\mu_s[X]$ писать просто α_s и μ_s .

Очевидно, для любой случайной величины центральный момент первого порядка равен нулю:

$$\mu_1 = M[\overset{\circ}{X}] = M[X - m_x] = 0, \quad (3.2.4.9)$$

так как математическое ожидание центрированной случайной величины всегда равно нулю. Выведем соотношения, связывающие центральные и

начальные моменты различных порядков. Вывод мы проведем только для прерывных величин; легко убедиться, что точно те же соотношения справедливы и для непрерывных величин, если заменить конечные суммы интегралами, а вероятности – элементами вероятности. Рассмотрим второй центральный момент:

$$\mu_2 = M[X^2] = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p_i = \sum_{i=1}^n x_i^2 p_i - 2m_x \sum_{i=1}^n x_i p_i + m_x^2 \sum_{i=1}^n p_i = \alpha_2 - 2m_x^2 + m_x^2 = \alpha_2 - m_x^2$$

Аналогично для третьего центрального момента получим:

$$\begin{aligned} \mu_3 &= M[X^3] = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^3 p_i = \sum_{i=1}^n x_i^3 p_i - 3m_x \sum_{i=1}^n x_i^2 p_i + 3m_x^2 \sum_{i=1}^n x_i p_i - m_x^3 \sum_{i=1}^n p_i = \\ &= \alpha_3 - 3\alpha_2 m_x + 2m_x^3. \end{aligned}$$

Выражения для μ_4, μ_5 и т.д. могут быть получены аналогичным путем.

Таким образом, для центральных моментов любой случайной величины X справедливы формулы:

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 &= 0, \\ \mu_2 &= \alpha_2 - m_x^2, \\ \mu_3 &= \alpha_3 - 3m_x \alpha_2 + 2m_x^3, \\ &\dots\dots\dots \end{aligned} \right\} \quad (3.2.4.10)$$

Вообще говоря, моменты могут рассматриваться не только относительно начала координат (начальные моменты) или математического ожидания (центральные моменты), но и относительно произвольной точки α :

$$\gamma_s = M[(X - \alpha)^s]. \quad (3.2.4.11)$$

Однако центральные моменты имеют перед всеми другими преимущество: первый центральный момент, как мы видели, всегда равен нулю, а следующий за ним, второй центральный момент при этой системе отсчета имеет минимальное значение. Докажем это. Для прерывной случайной величины X при $s=2$ формула (4.11) имеет вид:

$$\gamma_2 = \sum_{i=1}^n (x_i - a)^2 p_i. \quad (4.12)$$

Преобразуем это выражение:

$$\begin{aligned} \gamma_2 &= \sum_{i=1}^n (x_i - m_x + m_x - a)^2 p_i = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p_i - 2(m_x - a) \sum_{i=1}^n (x_i - m_x) p_i + (m_x - a)^2 = \\ &= \mu_2 + (m_x - a)^2. \end{aligned}$$

Очевидно, эта величина достигает своего минимума, когда $m_x = a$, т.е. когда момент берется относительно точки m_x .

Из всех моментов в качестве характеристик случайной величины чаще всего применяются первый начальный момент (математическое ожидание) $m_x = a$ и второй центральный момент μ_2 .

Второй центральный момент называется дисперсией случайной величины. Ввиду крайней важности этой характеристики среди других моментов введем для нее специальное обозначение $D[X]$:

$$\mu_2 = D[X].$$

Согласно определению центрального момента

$$\mu_2 = D[X] = M[X^2], \quad (3.2.4.13)$$

т.е. дисперсией случайной величины X называется математическое ожидание квадрата соответствующей центрированной

величины. Заменяя в выражении (3.2.4.13) величину $\bar{X}$ её выражением, имеем также:

$$D[X] = M[(X - m_x)^2]. \quad (3.2.4.14)$$

Для непосредственного вычисления дисперсии служат формулы:

$$D[X] = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p_i, \quad (3.2.4.15)$$

$$D[X] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx \quad (3.2.4.16)$$

- соответственно для прерывных и непрерывных величин.

Дисперсия случайной величины есть характеристика рассеивания, разбросанности значений случайной величины около её математического ожидания. Само слово «дисперсия» означает «рассеивание».

Если обратиться к механической интерпретации распределения, то дисперсия представляет собой не что иное, как момент инерции заданного распределения масс относительно центра тяжести (математического ожидания).

Дисперсия случайной величины имеет размерность квадрата случайной величины; для наглядной характеристики рассеивания удобнее пользоваться величиной, размерность которой совпадает с размерностью случайной величины. Для этого из дисперсии извлекают квадратный корень. Полученная величина называется средним квадратическим отклонением (иначе – «стандартом») случайной величины X . Среднее квадратическое отклонение будем обозначать $\sigma[X]$:

$$\sigma[X] = \sqrt{D[X]}, \quad (3.2.4.17)$$

Для упрощения записей мы часто будем пользоваться сокращенными обозначениями среднего квадратического отклонения и дисперсии: σ_x и D_x . В

случае, когда не возникает сомнения, к какой случайной величине относятся эти характеристики, мы будем иногда опускать значок x у σ_x и D_x и писать просто σ и D . Слова «среднее квадратическое отклонение» иногда будем сокращенно заменять буквами С.К.О.

На практике часто применяется формула, выражающая дисперсию случайной величины через её второй начальный момент (вторая из формул (5.7.10)). В новых обозначениях она будет иметь вид:

$$D_x = \alpha_2 - m_x^2. \quad (3.2.4.18)$$

Математическое ожидание m_x и дисперсия D_x (или среднее квадратическое отклонение σ_x) – наиболее часто применяемые характеристики случайной величины. Они характеризуют наиболее важные черты распределения: его положение и степень разбросанности. Для более подробного описания распределения применяются моменты высших порядков.

Третий центральный момент служит для характеристики асимметрии (или «скошенности») распределения. Если распределение симметрично относительно математического ожидания (или, в механической интерпретации, масса распределена симметрично относительно центра тяжести), то все моменты нечетного порядка (если они существуют) равны нулю. Действительно, в сумме

$$\mu_3 = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^3 p_i, \quad \text{при симметричном относительно } m_x \text{ законе}$$

распределения и нечетном 3 каждому положительному слагаемому соответствует равное ему по абсолютной величине отрицательное слагаемое, так что вся сумма равна нулю. То же, очевидно, справедливо и для интеграла

$$\mu_3 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^3 f(x) dx, \quad \text{который равен нулю, как интеграл в симметричных}$$

пределах от нечетной функции.

Естественно поэтому в качестве характеристики асимметрии распределения выбрать какой-либо из нечетных моментов. Простейший из них есть третий центральный момент. Он имеет размерность куба случайной величины: чтобы получить безразмерную характеристику, третий момент μ_3 делят на куб среднего квадратического отклонения. Полученная величина носит название «коэффициент асимметрии» или просто «асимметрии»; мы обозначим её S_k :

$$S_k = \frac{\mu_3}{\sigma^3}. \quad (3.2.4.19)$$

На рис. 4.1 показано два асимметричных распределения; одно из них (кривая I) имеет положительную асимметрию ($S_k > 0$); другое (кривая II) – отрицательную ($S_k < 0$).

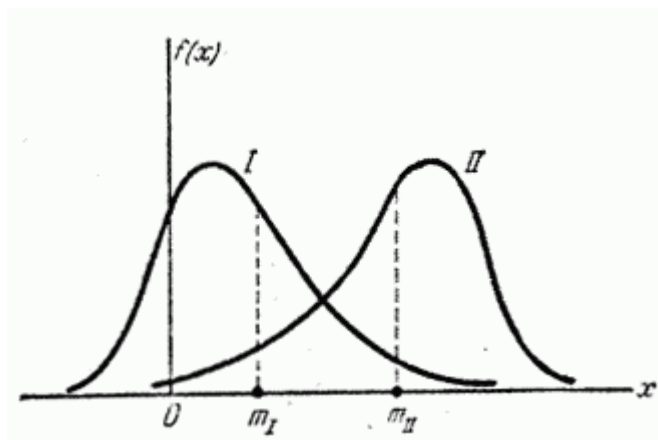


Рис. 3.2.4.1

Четвертый центральный момент служит для характеристики так называемой «крутости», т.е. островершинности или плосковершинности распределения. Эти свойства распределения описываются с помощью так называемого эксцесса. Эксцессом случайной величины X называется величина

$$(3.2.4.20)$$

Число (3) вычитается из отношения $\frac{\mu_4}{\sigma^4}$ потому, что для весьма важного и широко распространенного в природе нормального закона распределения (с которым, мы подробно познакомимся в дальнейшем) $\frac{\mu_4}{\sigma^4} = 3$. Таким образом, для нормального распределения эксцесс равен нулю; кривые, более островершинные по сравнению с нормальной, обладают положительным эксцессом; кривые более плосковершинные – отрицательным эксцессом.

На рис. 4.2 представлены: нормальное распределение (кривая I), распределение с положительным эксцессом (кривая II) и распределение с отрицательным эксцессом (кривая III).

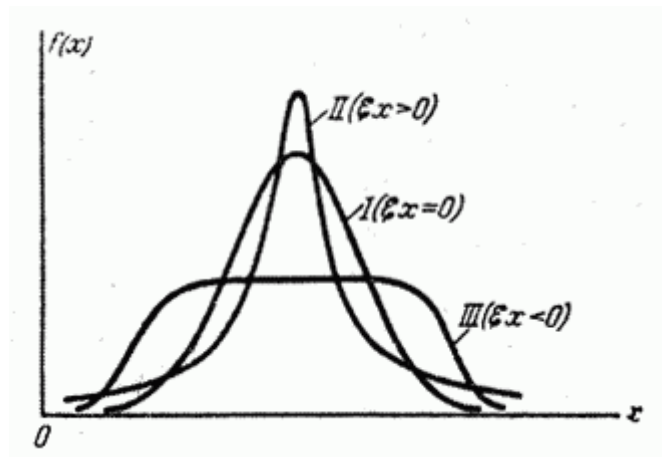


Рис. 3.2.4.2

Кроме рассмотренных выше начальных и центральных моментов, на практике иногда применяются так называемые абсолютные моменты (начальные и центральные), определяемые формулами

$$\beta_s = M[|X|^s]; \quad \nu_s = M[|X - \bar{x}|^s]. \quad (3.2.4.21)$$

Очевидно, абсолютные моменты четных порядков совпадают с обычными моментами. Из абсолютных моментов наиболее часто применяется первый абсолютный центральный момент

$$\nu_1 = M[\overset{\circ}{|X|}] = M[|X - m_x|], \quad (3.2.4.22)$$

называемый средним арифметическим отклонением. Наряду с дисперсией и средним квадратическим отклонением среднее арифметическое отклонение иногда применяется как характеристика рассеивания. Математическое ожидание, мода, медиана, начальные и центральные моменты и, в частности, дисперсия, среднее квадратическое отклонение, асимметрия и эксцесс представляют собой наиболее употребительные числовые характеристики случайных величин. Во многих задачах практики полная характеристика случайной величины – закон распределения – или не нужна, или не может быть получена.

В этих случаях ограничиваются приблизительным описанием случайной величины с помощью. Числовых характеристик, каждая из которых выражает какое-либо характерное свойство распределения.

Очень часто числовыми характеристиками пользуются для приближенной замены одного распределения другим, причем обычно стремятся произвести эту замену так, чтобы сохранились неизменными несколько важнейших моментов.

ВЫВОДЫ

1. Создана гидрометеорологическая база данных за период до 1965 г. путем оцифровки карт Мирового водного баланса (осадки, речной сток, испарение, испаряемость).
2. Создана ежемесячная база данных климатических характеристик по приземной температуре и осадкам в 400-х узлах расчетной сетки с шагом 2.5° с 1901 по 2014 гг.
3. По формуле Тюрка рассчитаны среднегодовые значения испарения и испаряемости в узлах расчетной сетки для периодов с 1901 по 1965 и с 1966 по 2014 гг. и сделано сравнение с картографическими материалами.
4. Рассчитаны и закартированы современные значения избытка и дефицита водных ресурсов рек и их изменения по сравнению с периодом 1901–1965 гг.

Избыток водных ресурсов рек наблюдается в экваториальной Африке, где выделены районы его увеличения, но в целом для континента он имеет тенденцию к снижению.

Литература

1. <http://geographyofrussia.com/klimat-afriki/>
2. Монография «Мировой водный баланс»
3. Климатический справочник Африки, часть 1 Температура, воздуха, осадки под редакцией д-ра геогр. наук А.Н. ЛЕБЕДЕВА; гидрометеорологическое издательство ленинград. 1968.
4. Лебедев А. Н. Некоторые особенности термического режима Африки. Труды ГГО, вып. 182, 1965.
5. Дмитриевский Ю.Д. Внутренние воды Африки и их использование. Л., гидрометеиздат, 1967. 382 с. с илл. Библиогр. : с. 361-381.
6. Орлов В.Г. , Дружинин В.С. Специфика водного режима территории стран Азии, Африки и Латинской Америки: учеб. пособие /Под ред. А.М. Владимировой.-Л.: ЛПИ, 1986.-68 с.-(ЛГМИ).
7. Аласан Т. А. Условия формирования засушливых явлений в Судано-Сахельской зоне Африки и их прогнозирование: Дис...канд. физико-математ. наук: Защищена 07.05.90г.- Л., 1990.-178 с.
8. Аэроклиматический справочник Африки. (Юж. Полушарие). Под ред. канд. Физ.-мат. наук З. И. Гавриловой. Л., Гидрометеиздат, 1972.
9. Климатический атлас Африки / Гл. Геофиз. Обсерватория им. А. И. Воейкова; Под ред. А. Н. Лебедева. – Л.: Гидрометеиздат, 1978.-40 см.
10. Климаты Африки. Под ред. д-ра геогр. наук А. Н. Лебедева и канд. геогр. наук О. Г. Сорочан. Л., гидрометеиздат, 1967.
11. Хамлили, А. Устойчивость моделей формирования многолетнего годового стока Северо – Западной Африки и долгосрочная оценка его статистических параметров при климатических изменениях. Специальность 25.

00. 27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия [Текст]:автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук ; РГГМУ / А. Хамлили ; РГГМУ.- СПб.,2011.-17с.