



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

Кафедра гидрофизики и гидропрогнозов

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

На тему **Изменение речного стока  
при возможных изменениях  
климата (на примере р. Енисей)**

Исполнитель

Рябов Станислав Константинович

Руководитель

к.г.н., доцент

Постников Александр Николаевич

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

к.т.н., доцент

Хаустов Виталий Александрович

«09» *июне* 2017г.

Санкт-Петербург  
2017



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

Кафедра гидрофизики и гидропрогнозов

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

На тему **Изменение речного стока  
при возможных изменениях  
климата (на примере р. Енисей)**

**Исполнитель** Рябов Станислав Константинович

**Руководитель** к.г.н., доцент

Постников Александр Николаевич

**«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой**

к.т.н., доцент

Хаустов Виталий Александрович

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017г.

Санкт–Петербург

2017

## Оглавление

Введение.....	3
1 Физико-географическое описание бассейна реки Енисей.....	4
1.1 Рельеф и геологическое строение.....	5
1.2 Климат.....	12
1.3 Почвенный и растительный покров.....	18
2 Формулы для расчета средних годовых величин испарения, радиационного баланса увлажненной поверхности и нормы годового стока.....	24
3 Расчет и оценка стока на территории бассейна реки Енисей при условиях изменения климата.....	28
3.1 Расчет годовых норм осадков.....	29
3.2 Расчет средних многолетних температур за теплый период.....	33
3.3 Расчет значений испаряемости по методике М.И Будыко.....	36
3.4 Расчет значений испаряемости по методике А.Н. Постникова.....	39
3.5 Расчет значений испарения по методике М.И. Будыко.....	41
3.6 Расчет значений испарения по методике А.Н. Постникова.....	44
3.7 Итоги расчетов испарения и стока по различным методикам и их сравнение.....	47
3.8 Расчет значений стока при заданных изменениях температуры воздуха и атмосферных осадков (методика М.И. Будыко).....	48
3.9 Расчет значений стока при заданных изменениях температуры воздуха и атмосферных осадков (методика А.Н. Постникова).....	52
3.10 Подведение выводов об изменении норм стока в бассейне реки Енисей – г. Игарка.....	55
Заключение.....	58
Список используемой литературы.....	60

## Введение

Проблемы изучения климата в наше время становятся все более актуальными. Накапливая и совершенствуя свои знания, человек оказывает все большее влияние на процессы, происходящие на Земле. Однако, вместе с этим, люди все меньше и меньше контролируют данные процессы. Именно поэтому, для человечества крайне важно предугадывать и прогнозировать изменения, касаемые природных условий.

В данное время существует большое количество всевозможных сценариев изменения климатических условий. Согласно результатам наблюдений, уровень мирового океана увеличился, а таяние ледников значительно ускорилось. Все это привело к появлению теорий о возможном потеплении климата и возникновении парникового эффекта. В тоже время, в последнее время возникают и другого вида теории, прямо противоположные – о возможном похолодании, которые опираются на различные геофизические факторы. Однако, на данный момент судить о том, какая из гипотез окажется верной – не представляется возможным.

Оценка современного состояния водных ресурсов является прямой задачей гидрологов. Однако, не менее важной задачей является своевременная оценка изменений, касающихся водных объектов.

Говоря об изменениях климата, стоит подразумевать изменение различных гидрометеорологических величин, образующих климат как таковой. Все данные величины, такие как: осадки  $X$ , температура воздуха  $t$ , испарение  $E$  и сток  $Y$  – взаимосвязаны через уравнение водного баланса. Опираясь на данную взаимосвязь, в работе произведены расчеты нормы стока, а также оценено ее изменение как при потеплении, хоть и незначительном, так и при похолодании.

Изменение норм осадков и температуры воздуха в данной работе задавались нами самостоятельно. Целью же работы являлось определение нормы стока при данных изменениях.

## 1 Физико-географическое описание бассейна реки Енисей

Река Енисей является самой многоводной рекой России – около 624 кубических километров воды в год выносятся ею в Карское море. При площади водосборного бассейна в 2 580 000 км<sup>2</sup> река занимает второе место в России и седьмое место среди рек мира.

По характеру водного режима, русла и строения долины, а также гидрографическим условиям бассейн Енисея делится на три основных участка: Верхний Енисей – от начала реки в точке слияния Большого и Малого Енисея до устья Тубы (длина 1238 км), Средний Енисей – от устья Тубы до устья Ангары (длина 717 км), Нижний Енисей – от устья Ангары до устья самого Енисея (длина 2137 км). Кроме того, отдельно рассматривается бассейн реки Ангара, длиной 1779 км. Общая же длина реки от истока Большого Енисея – 4092 километра, а от истока Малого Енисея – 4050 километров. Средний расход воды составляет около 19 800 м<sup>3</sup>/с.

У Енисея имеется множество притоков как правых, так и левых. Однако правые притоки доминируют по площади водосбора и по количеству приносимой воды. Одним из самых больших таких притоков является река Ангара. При слиянии с Енисеем она несет значительно больше воды, а площадь её бассейна составляет около 1 039 000 км<sup>2</sup>. Кроме того правыми притоками Енисея являются Подкаменная Тунгуска и Нижняя Тунгуска – реки, относящиеся по своим размерам и водности к большим водным артериям.

Бассейн Енисея расположен на территории двух стран: России, протекая через Республику Хакасия, Республику Тыва и Красноярский край и Монголии (небольшой участок верхнего течения Малого Енисея в крайней юго-восточной части бассейна). В гидрографическом отношении система Енисея относится к бассейну Северного Ледовитого океана.

## 1.1 Рельеф и геологическое строение

Для наиболее полного представления о нашем водном объекте, рассмотрим отдельно каждый отдельно взятый участок реки Енисей.

### Верхний Енисей

Верхний Енисей имеет горную долину. От города Кызыл до устья Хемчика река протекает среди горно-холмистой степной местности Тувинской котловины. На севере долина ограничена склонами отрогов Западного Саяна, переходя в Минусинскую впадину, на юге – пологими в нижних своих частях скатами отрогов хребта Таину-Ола.

Рельеф Тувинской котловины холмисто-равнинный, с участками мелкосопочника и полого наклоненных шлейфов. Для этого района характерно наличие множества межгорных изолированных котловин, в общей сложности простирающихся с запада на восток на 400 километров. Низкогорным массивом Адар-Даш Тувинская котловина разделяется на западную часть (Хемчикская котловина) и восточную часть (Улугхемская котловина) и находится в пределах бассейнов левых притоков Верхнего Енисея (Улуг-хема) и является наибольшей из всех котловин.

Ниже впадения реки Хемчик Енисей прорывается через Западный Саян. Это сильно расчлененная горная система, состоящая из горных хребтов с обширными выровненными поверхностями. Над среднегорными вершинами и плоско-верхними хребтами высотой до 2000 метров возвышаются более высокие остроконечные вершины и пилообразные гребни альпийского типа. К востоку от Енисея простирается хребет Куртушибинский, а наиболее высокие точки всего нагорья находятся на плато Алаш.

На северных склонах Западного Саяна берут начало правобережные притоки Абакана и Тубы. На южных – притоки Хемчика, Енисея и Большого Енисея. Долина реки тут на протяжении около 280 километров узкая, местами имеющая вид скалистого коридора-каньона шириной до 100-150 метров.

Ниже г. Саяногорска Енисей вступает в пределы обширной Минусинской впадины тектонического происхождения, где долина его становится достаточно широкой (5-15 километров). В средней части она прорезается долиной Енисея. Этот участок является наиболее низким (240-250 метров). На правобережной стороне дно представляет собой всхолмленную равнину, сложенную толщей рыхлых отложений. Местами наблюдаются небольшие поднятия (500-700 метров) с пологими склонами. Левобережная же часть характеризуется низкогорным рельефом, где не редко встречаются бессточные впадины и участки с куэстовыми формами рельефа.

### Средний Енисей

От устья Тубы до устья Ангары располагается Средний Енисей, который как и Нижний Енисей частично располагается в обширной Минусинской котловине. В её строении ярко выражены два яруса. Верхний ярус образуют невысокие хребты и кряжи, разделяющие между собой меньшие по размеру котловины Чулымо-Енисейскую и Сыдо-Ербинскую от Минусинской впадины. Чулымо-Енисейская котловина расположена севернее и простирается между Солгонским и Батеневским кряжами. Ее дно представляет собой холмистую равнину (150-300 метров), окаймлённую низкогорными грядами. Местность, примыкающая к долине Енисея, характеризуется особой расчлененностью: в образовавшихся в результате карстовых и эрозионных процессов понижениях располагаются небольшие бессточные озера.

Сыдо-Ербинская котловина располагается между Чулымо-Енисейской и Минусинской впадиной и значительно уступает им по размерам. В своей средней части она прорезана долиной Енисея. Правобережная же её часть характеризуется относительно спокойным рельефом, однако к долине Енисея возрастает расчлененность, появляются куэсты. Типично куэстовой является и левобережная приенисейская часть котловины.

Ниже по течению Средний Енисей до пос. Шумиха (район г. Дивногорска) утратил свой былой облик, так как на этом участке ныне расположено Красноярское водохранилище, возникшее в результате перекрытия реки мощной ГЭС. Оно было полностью заполнено водой в 1970г. При полном объеме площадь его зеркала составляет 2100 квадратных километров. Береговая линия крайне извилиста и периодически обрушаема, особенно в средней и в верхней частях водоема, в местах залегания супесчаных грунтов и лёссовидных суглинков. Ближе к плотине ГЭС берега в основном скалистые: вода тут подходит к бровке коренной енисейской террасы, которая преимущественно состоит из песков и супесчаных грунтов.

Ниже г. Красноярск к реке справа на протяжении 900 километров подходят отроги Енисейского кряжа, высотой 500-600 метров. Это древнее горное сооружение, сложенное метаморфическими породами, пронизанными интрузиями гранитов. Склоны и поверхность кряжа сильно расчленены, а многие участки характерны каменными россыпями – курумами. Река, вплоть до устья Ангары, течет у подножий Енисейского кряжа. Его крутые склоны местами почти отвесно поднимаются над урезом воды. Слева от реки простирается всхолмленная, залесенная и частично заболоченная местность. Долина имеет ширину до 10-11 километров и хорошо выраженный ассиметричный характер: правые ее склоны – крутые и высокие, левые – преимущественно пологие и умеренно крутые. Река часто преодолевает низкие отроги кряжа, поэтому на этом участке насчитывается 28 перекатов с малыми глубинами и значительными скоростями течения.



## Нижний Енисей

Нижний Енисей берет начало в устье Ангары, в месте, где происходит её слияние с Енисеем. До впадения Нижней Тунгуски имеет резко ассиметричную долину шириной до 10-20 километров и до 40 километров в местах расширений.

Правый склон, до впадения в Енисей Подкаменной Тунгуски, представлен, как и на Среднем Енисее, крутыми и высокими скалистыми склонами Енисейского кряжа, нередко поднимающимися от уреза воды отвесными скалами и утесами.

Далее, до устья Хинтайки, правый берег остается все еще гористым, однако, не столь высоким и крутым, каким он был ранее. Он образован западными отрогами Среднесибирского плоскогорья, простирающегося к северу вплоть до Северо-Сибирской низменности.

Среднесибирское плоскогорье – это обширное и достаточно широкое плато. Оно занимает западную часть Сибирской платформы, где широко распространены вулканические породы. Абсолютные высоты на большей части плоскогорья однообразны: их изменение происходит в пределе от 500 до 800 метров. Однако некоторые вершины горного массива Путорана, который является наиболее высокой частью плоскогорья, достигают отметок в 1400-1700 метров. Горы Путорана охватывают огромную территорию, разделенную глубокими разломами на ряд отдельных блоков, поднятий и возвышенностей. В некоторых местах глубина разломов достигает до 1000 метров.

Юго-западнее самой высокой части гор Путорана местность переходит в Тунгусское плато, со средней высотой около 1000 метров.

В далекие времена на Среднесибирском плоскогорье образовались огромные залежи каменного угля. В различные времена здесь образовались сланцы, известняки, песчаники, а также бесчисленное множество других осадочных пород. Кроме того на плоскогорье развиты магматические породы: базальты, диабазы и другие породы, близкие к ним по составу и происхождению.

На плоскогорье отчетливо видны следы продолжительной работы ледников: тут много цирков, каров, трогов и конечных морен. В местах последнего оледенения долины рек проложены по отложениям ледникового периода – они слабо разработаны, а террасы – отсутствуют. Однако в не подвергшихся оледенению районах террасы выражены отчетливо.

Ниже по течению Енисей пересекает границу Таймыра и прокладывает свой путь через Северо-Сибирскую тундровую низменность. Она протягивается параллельно горам Бырранга на 1100 километров, а ее ширина составляет около 400 километров. На низменности преобладает равнинный рельеф, иногда нарушаемый невысокими грядами и увалами. С поверхности низменность сложена толщей четвертичных отложений ледникового и морского происхождения.

На самом севере русло Енисея проходит вдоль узкой полосы Северо-Таймырской арктическо-полупустынной низменности, сложенной морскими четвертичными отложениями, среди которых местами выходят на поверхность коренные породы. Они нередко поднимаются над поверхностью на 50, а иногда и на 100 метров.

В то время как правый берег Енисея представлен Среднесибирским плоскогорьем и Таймыром, левый берег полностью расположен на Западно-Сибирской равнине, которая, в свою очередь, разделена на ряд подрайонов. Первый из них – Кеть-Чулымо Енисейская равнина, которая характеризуется сильной неоднородностью рельефа. Западная её часть сильно заболочена, с высотами 100-200 метров. В восточной же части располагается плоская водораздельная гряда, разделяющая бассейн Енисея и водосбор Оби. Ее

высота составляет 150-200 метров. В основном здесь преобладает пологоувалистый рельеф, а заболоченных участков крайне мало.

Ниже по течению русло Енисея проходит через Кеть-Енисейскую возвышенную равнину, которая является более приподнятой в высотном отношении по сравнению с другими равнинами. Здесь можно выделить более высокую среднюю часть, приподнятую под влиянием Енисейского кряжа. Эти отроги погребены под толщей ледниковых отложений, а высота моренных гряд достигает 200-300 метров. Несколько выше устья Подкаменной Тунгуски Енисей прорезает отрог кряжа, распространившийся на ее левый берег, образуя Осиновский порог, а сама долина здесь имеет вид ущелья. Северная часть района представлена тремя надпойменными террасами Енисея, общая ширина которых вместе с поймой составляет 50-60 километров. В южной же части развиты аллювиальные надпойменные террасы.

В районе слияния Нижней Тунгуски и Енисея левый берег представлен Тазовско-Енисейской холмистой равниной, которая состоит в основном из поймы и трех надпойменных террас Енисея. Их поверхность сильно заболочена. Не менее заболоченной является и Туруханская озерно-холмистая лесотундровая равнина, расположенная в районе речных портов Игарка и Дудинка. Однако в некоторых местах поверх заболоченной равнины возвышаются холмы, сложенные ледниковыми отложениями. Высота таких холмов порой достигает до 200 метров. В этом районе русло начинает делиться на рукава, ширина увеличивается до 7-12 километров. Глубина потока изменяется от 4-5 до 10-15 метров, а ниже Игарки она равна 20-40 метров.

На самом севере Западно-Сибирской равнины Енисей протекает через Гыданско-Енисейскую холмисто-грядовую тундровую равнину. Холмисто-моренный рельеф, зандровые заболоченные участки и краевые ледниковые образования, характерные для этой местности – следы последнего зырянского оледенения. Данная местность характеризуется сильными

понижениями и, как следствие, сильной заболоченностью пойменной части Енисея.

Ниже мыса Крестовского начинается устьевой участок реки длиной около 300 километров. Здесь имеются две группы островов – Мининские и Бреховские. В этом районе Енисей расчленяется на многочисленные рукава и протоки. Общая ширина реки в створе островов достигает 40-50 километров.

### Бассейн Ангары

Территория данного бассейна занимает юго-западную окраину Средне-Сибирского плоскогорья и большую часть горной системы Восточного Саяна. Линия водораздела бассейна на юге и юго-западе проходит по Большому Саяну и Енисейскому кряжу, на севере и северо-востоке – по водоразделу между притоками Ангары и Подкаменной Тунгуски, а на востоке граница проходит по Илимскому и Приморскому хребту, а также Онетской возвышенности.

Восточно-Саянское нагорье, характеризующее южную часть рассматриваемого бассейна, является обширной горной системой, простирающейся с северо-запада на юго-восток более чем на 1000 километров. Рельеф нагорья представляет собой сложную систему из высоких хребтов, плоскогорий, глубоких долин и понижений. Помимо этого, встречается большое количество участков, подвергавшихся в прошлом воздействию ледников: их следы деятельности выражены в наличии каров, цирков и троговых долин. Северная окраина системы представляет собой низкогорье, где высотные отметки не превышают 1000 метров.

К подножию Восточного Саяна примыкает пониженная часть плоскогорья – Предсаянская впадина, представленная Иркутско-Черемховской равниной на востоке и Канско-Рыбинской – на западе. Поверхности междуречий здесь имеют высоту до 700 метров. Далее, по

направлению на север, местность постепенно повышается, достигая своих максимальных высот на границе бассейна.

В центральной части бассейна четко прослеживается полоса высот трапповых массивов – Ангарский кряж. Наибольшая его отметка составляет 1022 метров. С севера, к нему вплотную подходит Ковинский кряж с высотами до 650 метров, а с юга примыкает Бирюсинское плато с небольшими высотами (до 500 метров).

В пределах рассматриваемого бассейна залегают породы разных возрастов. На юге, в горных областях широко распространены породы архейского и протерозойского возрастов, представленные гнейсами, мрамором, сланцами, а также кристаллическими известняками и кварцитами. Мощность данных отложений измеряется несколькими километрами.

Центральную часть бассейна занимают силурийские и ордовикские отложения, в основном представленные мергелями, песчаниками и известняками, говоря о силурийских отложениях и красноцветными породами – говоря о ордовикских. В западной части и на севере бассейна небольшими полями залегают породы девонского, пермского и каменноугольного возрастов.

Помимо этого, на территории Ангарского бассейна сохранились небольшие участки третичных отложений, сложенные, в большей мере, глинами, песчаниками и в редких случаях песками. Четвертичные же отложения представлены в основном аллювием, слагающим многочисленные террасы крупных рек.

## 1.2 Климат

Климат описываемой территории отличается резко выраженной континентальностью: зимы тут суровые, а летние сезоны непродолжительны. Суровость зимы обуславливается преобладанием здесь антициклонального

режима погоды с частыми морозами. Суточная амплитуда колебания температуры воздуха достигает 10-20, а иногда и 30 градусов.

Летом, воздушные массы над всей данной территорией переносятся с запада на восток, и лишь иногда с юга и юго-запада, нередко принося с собой обильные осадки. Осенью, наоборот, воздушные массы приходят с севера, а зимой, особенно с декабря по февраль, циклоническая деятельность практически не проявляется. В целом, деятельность циклонов наиболее развита в западной части бассейна, так как восточнее Енисея происходит оклюдирование циклонов. Кроме всего прочего, на климат данного региона оказывает огромное влияние расположение хребтов и склонов относительно движения влажных воздушных масс.

На рассматриваемой территории, вытянутой более чем на 30 градусов в меридиональном направлении, хорошо представлена широтная зональность, а вертикальная поясность климатических условий обусловлена наличием гор высотой более 1000 метров. Ярко выражены следующие широтные зоны: арктическая и полярная пустыни, тундра, лесотундра, травяные леса с островами лесостепи, островные степи и горно-таежные леса и гольцы.

Рассмотрим отдельные компоненты, составляющие климат данного бассейна.

#### Радиационный баланс

Минимальные средние многолетние значения радиационного баланса наблюдаются на крайнем севере, к югу они постепенно увеличиваются. В годовом ходе его минимум наблюдается в декабре – январе. Наибольший же наблюдается в июне – июле и не претерпевает существенных изменений по территории бассейна. Кроме того, высокий радиационный баланс часто отмечается весной, когда начинается период снеготаяния (в апреле – на юге и в мае – на севере) за счет уменьшения облачности в этот период.

Рассматривая горы, можно заметить, что радиационный баланс с высотой уменьшается каждые 100 метров, хотя суммарная радиация несколько повышается. Объясняется это тем, что увеличивается длинноволновая радиация, отражаемая от гор, площадь поверхности которых значительно больше площади равнин. Кроме того, за счет увеличения общей облачности уменьшается число часов солнечного сияния.

В бассейне Ангары годовые значения радиационного баланса повышаются с севера на юг. Максимальные значения чаще всего отмечаются в июне и июле, а минимальные на преобладающей части территории – в декабре и январе.

### Температура воздуха

Средняя многолетняя годовая температура воздуха почти на всем протяжении рассматриваемого района имеет отрицательные значения. Только в степной части Минусинской котловины и в районе Красноярска она имеет положительные значения (0,1-0,5 градусов).

Зима на севере суровая, продолжительная и сопровождается сильными ветрами. Она начинается во второй половине сентября и продолжается до 10 месяцев. В центральной зоне зима не менее холодная, однако ее продолжительность около 6-7 месяцев. Менее суровой она становится южнее бассейна Ангары – здесь ее продолжительность составляет около 5 месяцев. Наиболее холодный месяц – январь. В зависимости от характера рельефа и высоты водосбора средняя месячная температура колеблется от – 36 до -15 градусов. Так как в зимнее время преобладают антициклоны, в бассейнах Нижней и Подкаменной Тунгусок наблюдаются сильные морозы, а температуры достигают отметок в -38 градусов.

Самые минимальные температуры наблюдаются на побережье Карского моря – -52 градуса Цельсия. Суровость зимы обусловлена здесь

преобладанием антициклонального режима с частыми затишьями и морозами.

Наиболее теплым месяцем является июль. К югу температура быстро возрастает, повышаясь более чем на один градус на каждый градус широты. Однако этот рост замедляется южнее г. Игарки. В горах температура воздуха понижается на каждые 100 метров высоты.

Устойчивый переход температуры через 0 градусов в южной части рассматриваемого района, в частности в Минусинской котловине, происходит в конце марта. В горах Западного и Восточного Саяна сильно запаздывает и на высоте около 3000 метров переход через 0 градусов наступает только в июне. В Нижнем Енисее, расположенном на Северо-Сибирской низменности и на Среднесибирском плоскогорье данный переход происходит в конце мая.

Рассматривая годовой ход температур, наблюдается быстрое ее нарастание в южной части бассейна в период с марта по апрель. Тем не менее, весной не редки заморозки. Суточная же весенняя температура при ясной погоде изменяется от 10 градусов в долине Енисея до 23 на Среднесибирском плоскогорье. Заморозки же на крайнем севере периодически бывают и в июле-августе.

## Осадки

Наиболее увлажненной является центральная, самая возвышенная часть бассейна Енисея. Циклоническая деятельность здесь проявляется как летом, так и зимой. Самое большое количество осадков выпадает в июле, а на крайнем севере – в августе. Наименьшее же количество влаги выпадает зимой, так как над территорией Сибири формируется антициклон.

На большей части территории в теплое время года выпадает осадков больше, чем в холодный период. Наибольшее их количество выпадает в горах Западного и Восточного Саяна (от 700 до 2000 миллиметров) и на



западных склонах плато Путорана (местами более 2000 миллиметров). На западном склоне Енисейского кряжа сумма осадков варьируется от 1000-1500 миллиметров на вершинах и около 700 миллиметров у подножий.

Восточнее Енисейского кряжа и плато Путорана количество осадков резко уменьшается и составляет в среднем 400-500 миллиметров в долине реки. Далее, сумма осадков снова возрастает и достигает отметок в 700-800 миллиметров в истоках таких рек, как Подкаменная и Нижняя Тунгуски.

Южнее и севернее зоны наибольшего увлажнения количество осадков уменьшается. На севере это обусловлено тем, что понижается общее количество влаги в атмосфере, а на юге понижение происходит из-за повышения температуры воздуха и дефицита влажности, что особенно характерно для межгорных котловин. В Минусинской котловине минимальное количество осадков за год составляет 330 миллиметров, а в Тувинских котловинах оно уменьшается до 200 миллиметров.

Распределение по территории максимальных суточных осадков в целом повторяет распределение их среднего количества. Их наименьшие количества наблюдаются на побережье Карского моря и в районе Северо-Сибирской низменности. Южнее их количество возрастает, а максимальные значения отмечаются в районах предгорий и в горах.

Интенсивность дождей на территории возрастает с севера на юг. В районе Карского моря среднее ее значение колеблется от 0,005 до 0,012 мм/мин., на Среднесибирском плоскогорье оно составляет 0,012 мм/мин., а в горах доходит до значений, равных 0,023 мм/мин. В бассейне Ангары в пределах всей рассматриваемой территории интенсивность изменяется от 0,02 до 0,09 мм/мин.

Ветер

В районе побережья Карского моря зимой преобладают ветры, дующие с суши и имеющие в основном южное, юго-восточное и юго-западное направления. Со стороны же самого Карского моря они наблюдаются редко.

В бассейне Нижней Тунгуски чаще преобладают ветры восточных румбов, а в бассейне Подкаменной Тунгуски – южных и западных направлений. В районе бассейна Ангары, благодаря антициклоническому характеру погоды велика повторяемость штилей.

Южнее Ангары, для межгорных долин характерны ветры, дующие по направлению течения рек. Таким образом, в данном районе велико влияние местных орографических условий. Так, например, в Тувинской котловине, под влиянием рельефа преобладают ветры восточных и юго-восточных румбов.

В летний период преобладают ветры юго-западного направления, однако, вместе с тем, не редки и ветры северных и северо-восточных румбов. Для горных же районов характерны местные долинские ветры.

Скорости ветра в зимний период претерпевают резкие изменения с севера на юг. Так, к примеру, в пределах Северо-Сибирской низменности, наибольшие скорости ветра составляют в среднем 7-9 м/сек. Далее, по направлению в глубь континента они уменьшаются до 4-5 м/сек. у Игарки и до 1 м/сек. в районе Тувинской котловины. В то же время, для Ангары характерны небольшие скорости ветра зимой и летом – они не превышают 1-2 м/сек. Однако для весны и осени, в связи с развитием циклонической деятельности, характерно существенное увеличение скоростей ветра – до 4-5 м/сек.

### Снежный покров

Раньше всего снежный покров образуется на островах Карского моря, в горах Бырранга и на плато Путорана – в конце августа. Затем, в сентябре,

снегом покрываются вершины Западного и Восточного Саяна. На хребты Танну-Ола снег выпадает лишь в конце сентября.

Устойчивый снежный покров во всей таежной зоне образуется в течении октября, а в начале ноября он достигает степной зоны. Разрушение же снежного покрова на всей территории начинается только после наступления дневных положительных температур.

Средняя высота слоя снега на протяжении всей территории колеблется в большом диапазоне: от 5-10 сантиметров в районе Минусинской котловины, до 150-200 сантиметров в горах Путорана, Енисейского кряжа и Западного Саяна.

Как и высота слоя снега, величина запасов воды в снежном покрове колеблется в больших пределах. Так, в зоне сухих степных районов их величина составляет от 20 до 40 миллиметров. В тоже время, на высотах Саян, Путорана и Енисейского кряжа значение влагозапасов в снеге достигает до 500 миллиметров.

Интенсивность снеготаяния в степных районах в среднем составляет 3-5 мм/сутки, а в горных районах и на территории Среднесибирского плоскогорья до 9 мм/сутки.

### 1.3 Почвенный и растительный покров

#### Верхний Енисей

Большая часть Верхнего Енисея имеет преимущественно горную долину. Именно поэтому, для данной территории характерна хорошо выраженная вертикальная поясность. Так, высокогорный пояс Алтайско-Саянско-Тувинской горной провинции характерен большим разнообразием горно-тундровых и горно-луговых почв. В то же время, в горно-лесном поясе наибольшее распространение получили кислые оподзоленные и неоподзоленные, горно-лесные дерновые и горные серые лесные почвы.

Ниже по течению, в центральной части, орография и месторасположение склонов оказывают существенное влияние на почвообразовательные процессы. Как следствие, почвы имеют здесь легкий механический состав и эродированы в той или иной мере.

В самой северной части бассейна имеются массивы сухих степей с присущими им каштановыми и темно-каштановыми почвами. По окраинам же котловины распространение получили южные, обыкновенные и выщелоченные черноземы.

Для нижнего пояса гор Западного Саяна характерно большое количество сухих лиственничных лесов с богатым травянистым покровом. По направлению к горам Центрального Саяна они постепенно сменяются темнохвойными лесами с редким преобладанием пихты. В обеих данных горных системах довольно хорошо выражены альпийские луга. Венчают же данные массивы горные моховые тундры, переходя с высотой в снеговые линии.

Характерной чертой южной части бассейна является наличие большого количества степной растительности, контактирующей с лесной и высокоальпийской. Здесь довольно четко проявлена широтная зональность. Тувинская и Хемчинская котловины практически полностью заняты степью, лишь только в предгорьях растительность постепенно начинает сменяться лиственницей. Чистые лиственничные леса расположены только на западном и восточном склонах хребта Танну-Ола.

В расположенном выше поясе, лиственничные горные таежные леса сменяются лиственнично-елово-кедровыми на высоте около 1300 метров. Кедровые леса, в чистом виде, можно встретить в северо-восточной части горных обрамлений, в то время как сосновые леса не имеют большого распространения и встречаются только на востоке.

Выше отметок в 1600 метров начинается субальпийский пояс, представленный степями и зарослями кустарника, а в юго-западной части хребтов, на высоте до 3000 метров получила развитие Альпийская

растительность. Здесь распространены мохово-лишайниковые, пятнистые и лишайниковые тундры.

### Средний Енисей

Вся южная территория Среднего Енисея является лесостепной зоной, которая в основном представлена массивами Красноярской и Канской лесостепи. Наиболее характерными здесь являются суглинистые и глинистые почвообразующие породы, а по долинам рек распространены суглино-супесчаные аллювиальные отложения. Господствующее значение в этом районе имеют серые лесные глееватые почвы и выщелоченные мерзлотно-глееватые черноземы.

В приенисейских степях проявляется особая, концентрическая зональность, характерная усилением степной растительности к центру.

Зона степей Минусинской котловины состоит из трех основных массивов: Северо-Хакасских, Абаканских и Минусинских степей, в которых преобладает четырехзлаковая степь, с произрастающими там типчаком, ковылем и другими видами растительности. В некоторых местах встречаются лиственнично-березовые перелески и остепненные луга.

Канская лесостепь занимает обширные равнинные участки, где среди лугово-степной растительности иногда встречаются массивы сосново-березовых перелесков, с примесью лиственницы. В то же время, Красноярская лесостепь по большей части распахана и занята посевами зерновых культур.

С севера Канскую лесостепь окаймляет зона подтайги и островных лесостепей, в которой распространены сосново-березовые и березовые леса, постепенно сменяемые темнохвойными травянистыми лесами. В некоторых местах, где проявляется деятельность человека, развиты лесные луга и пашни. В самой долине Енисея также расположены обширные площади, занятые лугами.

Для северных районов, что особенно характерно для Енисейского кряжа, наиболее распространенными являются почвообразующие породы суглинистого и глинистого состава элювиального происхождения, а долины рек сложены аллювиальными песчано-глинистыми отложениями. На большей части территории почвы маломощные, дерново-слабоподзолистые, дерново-лесные и кислые неоподзоленные.

### Нижний Енисей

В пределах всей рассматриваемой территории почвенный покров крайне разнообразен. На его образование оказывают влияние континентальность климата, экспозиция склонов гор, а также наличие многолетнемерзлых грунтов.

Переход от бассейна Среднего Енисея к Нижнему сопровождается сменой лесостепной зоны на лиственно-лесную подзону тайги. В ее пределах выделяются горы Енисейского кряжа, для которого характерна высотная зональность. Его подножия покрывают глеево-мерзлотные таежные почвы. Выше отметок 800 метров берет начало горная тундра, с преобладанием каменистых горно-тундровых почв, а выше 1200 метров – горная каменистая полярная пустыня.

Растительность района представлена редкостойными лиственнично-сосновыми лесами, а в средней части не редко преобладают елово-пихтовые леса.

Севернее Енисейского кряжа местность переходит в обширную лесную зону (тайгу), которая разделена на несколько подзон и провинций.

Южно-таежная подзона в пределах Западно-Сибирской провинции характеризуется темнохвойными, сосновыми и смешанными лесами, под которыми развиты подзолистые, подзолисто-глеевые и болотные почвы. Для

междуречий же характерны песчаные и суглинистые почвообразующие породы. В депрессиях нередко встречаются безлесные сфагновые болота.

В среднетаежной подзоне довольно широкое распространение получили подзолисто-болотные и подзолисто-болотно-глеевые почвы. В местах произрастания хвойных и лиственно-хвойных лесов сформированы дерново-подзолистые почвы, а террасы, сформированные песком и суглино-супесчаниками покрыты сосновым лесом.

Северо-таежная же подзона разделена на Западно-Сибирскую и Среднесибирскую провинции. На всей Западно-Сибирской провинции в основном распространены глеево-подзолистые, аллювиально-гумусовые, подзолистые и болотные почвы, все из которых являются маломощными. В Среднесибирской провинции почвенный покров также имеет небольшую мощность, а основное распространение получили глеево-мерзлотнетаежные, скелетные и слабоподзолистые почвы.

В условиях мерзлого грунта преобладают кедрово-елово-лиственничные леса, а также подлески из ольхи и карликовой березы. Поймы рек заняты березовыми лесами, а по низменным берегам активно развивается луговая и кустарниковая растительность.

Субарктическая зона тундровых почв также делится на две провинции. Под мохово-лишайниковой и кустарниковой растительностью почвы преимущественно развиваются на почвообразующих породах морского и ледникового происхождения. В северной же части распространены болотные и торфяно-глеевые почвы. Растительность представлена низкорослым полярным кустарником, мхом и лишайником, произрастающими только в трещинах между полигонами.

Крайний север Таймырского полуострова расположен в арктической зоне. Наиболее распространены почвообразующие породы ледникового происхождения, следствием чего является преобладание здесь арктических дерновых и арктических глеевых почв. Местами, в понижениях с большим поверхностным увлажнением хорошо развиты торфяные грунты.

Растительность в данной зоне крайне скудна и практически отсутствует. Лишь небольшие участки заняты мхами.

### Бассейн Ангары

В Ангарском бассейне почвенный слой отличается своим своеобразием. Его формирование происходит под воздействием разнообразных подстилающих пород, резко континентального климата и распространенностью по территории сезонной и многолетней мерзлоты. В то же время, значительная протяженность бассейна и расчлененность рельефа обуславливают многообразие и изменение растительности по зонам и поясам.

Почвы и растительность Восточно-Саянского нагорья распределены по закону вертикальной поясности. На высотах от 600-900 метров наибольшее распространение получили горно-лесные и мерзлотно-болотные почвы. Выше данных отметок расположен горно-таежный пояс, где основной растительностью являются хвойные леса, состоящие из кедра, ели и пихты, произрастающие на подзолистых и дерново-подзолистых почвах. Выше отметки 1700 метров господствует лишайниковая горная тундра, чередующаяся с пустошами, а почвенный покров как таковой – отсутствует.

На всей равнинной части бассейна наиболее распространены дерново-лесные, подзолистые и серые лесные почвы. Вместе с тем, по долинам всех крупных рек преобладают мерзлотно-луговые почвы, а по долинам малых рек – мерзлотно-болотные.

Большая северная часть равнинной территории относится к зоне южной тайги, а юго-восточная – к лесостепной. Преобладающим типом растительности на всей территории являются хвойные леса, однако не менее значительную площадь занимают мелколиственные леса – осиновые и березовые.



Помимо лесов, в Ангарском бассейне распространены степи, луга и болота. Болотная растительность занимает наибольшую территорию из всех перечисленных и основное распространение получила на дне речных долин и в истоках горных рек.

2      Формулы для расчета средних годовых величин испарения и, радиационного баланса увлажненной поверхности и нормы годового стока

С давних пор проблеме описания взаимосвязи речного стока и испарения с атмосферными осадками уделялось повышенное внимание. Для этих целей использовались так называемые уравнения связи, т.е. уравнения, связывающие средние многолетние значения (нормы) испарения ( $E$ ) и осадков ( $X$ ) посредством параметра  $E_0$ , который называется испаряемостью, т.е. максимально возможным испарением с предельно увлажненной поверхности при данных метеорологических условиях. С начала прошлого века известны уравнения Ольдекопа (1) и Шрейбера (2).

$$E = E_0 th \frac{X}{E_0} \quad (1)$$

$$E = X \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_0}{X}\right) \right], \quad (2)$$

где  $E$  – значение испарения;

$E_0$  – значение испаряемости;

$X$  – осадки;

$th$  – математическая функция - гиперболический тангенс.

В середине прошлого века советский ученый М.И. Будыко, проведя расчеты по этим уравнениям, пришел к выводу, что, по его мнению, первое уравнение дает несколько завышенные значения испарения, а второе их заметно занижает. Поэтому, Будыко предложил их объединить в виде среднего геометрического, т.е.

$$E = \sqrt{E_0 X (1 - \exp(-\frac{E_0}{X})) \operatorname{th} \frac{X}{E_0}} \quad (3)$$

Последнее уравнение стало называться уравнением Будыко. Для определения испаряемости он предложил выражение

$$E_0 = \frac{R}{L}, \quad (4)$$

где  $R$  – радиационный баланс увлажненной поверхности, который характеризует тепловые ресурсы территории;  
 $L$  – удельная теплота испарения, в системе СИ равная  $25 \cdot 10^5$  Дж/кг

Таким образом, было сделано допущение, что все тепловые ресурсы территории могут быть использованы только на максимально возможное испарение, т.е. допускалась возможность тепловой машины с коэффициентом полезного действия, равным единице, что, как известно из курса физики, невозможно. После установления формулы (4) уравнение (3) приняло вид

$$E = \sqrt{\frac{R}{L} X (1 - \exp(-\frac{R}{L} X)) \operatorname{th} \frac{L}{R} X} \quad (5)$$

Уравнение (5) широко использовалось в нашей стране для расчета норм годового испарения с поверхности суши. В нашей работе оно является одним из основных расчетных уравнений.

Для средних многолетних условий уравнения теплового и водного балансов территории соответственно имеют вид

$$R = LE + P \quad (6)$$

$$X = E + Y, \quad (7)$$

где  $LE$  – затраты тепла на испарение;  
 $P$  – турбулентный теплообмен между подстилающей поверхностью и воздухом;

$Y$  – речной сток

В уравнении (6) присутствуют радиационный баланс (составляющая теплового баланса) и осадки (составляющая водного баланса). Таким образом, это уравнение объединяет (связывает) эти два баланса. Поэтому Будыко назвал (6) уравнением связи. Впоследствии, так стали называть и другие уравнения вида

$$E = f(X, E_0)$$

Кроме приведенных уравнений известны также уравнения Н.А. Багрова, В.С. Мезенцева, В.Н. Малинина, Л. Тюрка, которые здесь не приводятся, так как они не использованы в нашей работе.

На кафедре гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ также было получено уравнение связи А.Н. Постникова

$$E = E_0(1 - e^{-z}) \quad (8)$$

где  $z = \frac{X}{E_0} + 0,5 \left( \frac{X}{E_0} \right)^2$

Для определения испаряемости было предложено уравнение

$$E_0 = 16,8(0,8 + 0,011t_n)(90 - 52e^{0,11(6-t_n)}) \quad (9)$$

Значение  $t_n$  рассчитывается по формуле

$$t_n = \frac{\sum t_i}{12}, \quad (10)$$

где  $\sum t_i$  – сумма среднемноголетних среднемесячных температур воздуха за месяцы теплого периода года

Здесь к месяцам теплого периода года относятся месяцы с неотрицательными нормами температуры воздуха.

В работе А.Н. Постникова было применено уравнение для выражения радиационного баланса увлажненной поверхности

$$R = 41,9(90 - 52e^{0,11(6-t_n)}) \quad (11)$$

, которое показало достаточно высокую надежность при расчетах радиационного баланса увлажненной поверхности для территории бывшего

Советского Союза. Если рассчитывать испаряемость так, как предложил Будыко, то

$$E_0 = \frac{R}{L} = 16,8(90 - 52e^{0,11(6-t_n)}) \quad (12)$$

В уравнении (9) выражение, стоящее в первых скобках определяет, какая доля радиационного баланса расходуется на испаряемость. Это уравнение использовалось для определения испаряемости при расчете норм испарения с территории России и других отдельных стран. Уравнение (8) тоже использовалось, как и уравнение Будыко, испаряемость для которого определялась по уравнению (12).

Общее число примененных уравнений связи было шесть и результаты расчета по всем уравнениям можно было признать удовлетворительными, так как относительные погрешности по сравнению с данными карт испарения, построенных в Государственном гидрологическом институте, составили от 6 до 10%.

Зная нормы годового испарения с поверхности суши, можно определить нормы годового стока, используя уравнение (7)

$$Y = X - E$$

При изменениях климата будут меняться нормы осадков и температуры воздуха. Приведенные здесь уравнения могут позволить оценить изменение норм речного стока с того или иного водосбора при различных сочетаниях изменений температуры и осадков. В данной работе оценка изменений стока в бассейне реки Енисей при возможных изменениях климата проводилась по этим уравнениям. При этом, как показали расчеты, для условий бассейна Енисея в формулу для определения испаряемости нужно внести небольшие изменения, а именно, в первых скобках слагаемое, равное 0,8, заменить на 0,7, т.е. расчеты проводились по формуле

$$E_0 = 16,8(0,7 + 0,011t_n)(90 - 52e^{0,11(6-t_n)}) \quad (13)$$

### 3 Расчет и оценка стока на территории бассейна реки Енисей при условиях изменения климата

В данной работе для определения нормы годового стока использовалось уравнение  $Y = X - E$ . Так как в данном выражении норма осадков  $X$  была известна, то основной задачей стало определение нормы испарения  $E$ . Данная величина была рассчитана по двум различным методикам.

В дальнейшем описание бассейнов всего Енисея для наибольшей точности расчетов был условно разделен на 5 основных частей: бассейн Нижней Тунгуски, Подкаменной Тунгуски, Ангары (в данном бассейне расчеты велись без учета стока с озера Байкал), левобережный бассейн всего Нижнего Енисея и, наконец, бассейны Верхнего и Среднего Енисея (в дальнейших расчетах объединенные в один бассейн и названные Верхним Енисеем).

Для каждого отдельно взятого бассейна из климатического справочника были взяты значения норм осадков и температуры воздуха для 7-11 различных метеостанций.

При дальнейших расчетах было предположено, что норма осадков может принимать разные виды значений:  $\bar{X} - 0,05 \bar{X}$ ,  $\bar{X}$  и  $\bar{X} + 0,05 \bar{X}$ . Температура воздуха также принимала в данной работе различные значения:  $t - 0,5^\circ\text{C}$ ,  $t^\circ\text{C}$  и  $t + 0,5^\circ\text{C}$ . Из всех этих величин в дальнейшем было получено девять различных комбинаций (вариантов климата).

### 3.1 Расчет годовых норм осадков

Таблица 3.1.1 – Годовые нормы осадков для станций бассейна Нижняя Тунгуска.

№	Пункт/Станция	X, мм	X <sub>ср</sub> , мм
Нижняя Тунгуска			
1	Герасимовка	689	534
2	Большой Порог (станция)	486	
3	Ногинский Рудник	542	
4	Кочумдек	569	
5	Тутончаны	620	
6	Виви	414	
7	Учами	539	
8	Кислокан	321	
9	Кербо	406	
10	Усть-Северная	755	

Атмосферные осадки в бассейне Нижней Тунгуски распределены неравномерно по территории. В районе устья реки выпадает максимальное количество осадков, что обусловлено наличием здесь хорошо увлажняемых осадками склонов. Так, к примеру, на станции Усть-Северная значение осадков составляет 755 миллиметров. В тоже время, по

направлению к истокам реки, количество выпадающих осадков плавно уменьшается и составляет в восточной части бассейна, в частности на станции Кислокан – 321 миллиметр. Среднее же значение нормы осадков для всего бассейна составило 534 миллиметра.

Таблица 3.1.2 – Годовые нормы осадков для станций бассейна Подкаменная Тунгуска.

№	Пункт/Станция	X, мм	X <sub>ср</sub> , мм
Подкаменная Тунгуска			
1	Кузьмовка	699	596
2	Полигус	567	
3	Перевалочная База	700	
4	Байкит	518	
5	Усть-Камо	456	596
6	Ванавара	478	
7	Таимба	426	
8	Черный остров	715	
9	Подкаменная Тунгуска	671	
10	Вельмо	728	

В бассейне Подкаменной Тунгуски величина атмосферных осадков, как и в бассейне Нижней Тунгуски, распределена неравномерно, постепенно уменьшаясь к восточной части бассейна. В то время как в устьевой части их значение составляет 728 миллиметров на станции Вельмо, в истоках реки значение осадков уменьшается до 426 миллиметров на станции Таимба. Среднее значение нормы осадков для всего бассейна составило 596 миллиметров.

Таблица 3.1.3 – Годовые нормы осадков для станций бассейна реки Ангара.

№	Пункт/Станция	X, мм	X <sub>ср</sub> , мм
Ангара			
1	Кежда	364	518
2	Чадобец	365	

3	Климино	446
4	Каменка	482
5	Раздолинск	579
6	Богучаны	458
7	Татарка	734
8	Мотыгино	556
9	Рыбное-на-Ангаре	573
10	Кулаково	624

Распределение осадков в бассейне реки Ангара осуществляется также неравномерно. В районе, где происходит слияние Енисея и Ангары значение выпадающих осадков максимально и составляет 734 миллиметра в пункте Татарка. Для равнинной же восточной части характерно весьма небольшое количество осадков. На станциях Кежма и Чадобец их значение составляет 364-365 миллиметров. Разница наибольшего и наименьшего значений осадков в бассейне составила 370 миллиметров, а средняя норма всего бассейна – 518 миллиметров.

Таблица 3.1.4 – Годовые нормы осадков для левобережных станций Нижнего Енисея.

№	Пункт/Станция	X, мм	X <sub>ср</sub> , мм
Левый берег Енисея			
1	Янов Стан	582	626
2	Верещагино	670	
3	Келлог	569	
4	Советская Речка	520	
5	Игарка	705	
6	Александровский Шлюз	582	
7	Ворогово	693	
8	Сым	565	
9	Климино	721	
10	Ярцево	667	

Единственным бассейном, где распределение осадков происходит относительно равномерно по всей площади, является левый берег Нижнего



Енисей. На данном водосборе количество осадков колеблется в диапазоне от 520 до 721 миллиметра, а определенная закономерность в их распределении по территории – отсутствует. Среднее значение нормы для бассейна составляет 626 миллиметра.

Таблица 3.1.5 – Годовые нормы осадков для станций бассейна Верхнего Енисей.

№	Пункт/Станция	X, мм	X <sub>ср</sub> , мм
Верхний Енисей			
1	Богунай	563	686
2	Столбы	686	
3	Старики	668	
4	Верхний Сисим	809	
5	Тюхтят	639	
6	Буйба	939	
7	Усть-Уй	650	
8	Усть-Кизас	997	
9	Матур	697	
10	Тозан	431	
11	Усть-Ужеп	471	

Для бассейна Верхнего Енисей характерно крайне неравномерное распределение атмосферных осадков. В истоках Енисей, расположенных в высокогорных районах, количество осадков достигает своих самых маленьких значений – 471 миллиметр в пункте Усть-Ужеп, расположенном на Малом Енисее и 431 миллиметр в пункте Тозан на Большом Енисее. В тоже время, наибольшие значения осадков наблюдаются в устье реки Абакан, впадающей в Енисей в районе Минусинска. Максимальное количество осадков здесь составляет 997 миллиметров.

Сравнивая между собой все рассматриваемые бассейны можно сделать вывод о том, что распределение осадков по всей территории бассейна происходит неравномерно. Исключение составляет лишь левобережная часть Нижнего Енисея. Средние же значения норм осадков в бассейнах варьируются в диапазоне от 518 миллиметров до 686 миллиметров.

### 3.2 Расчет средних многолетних температур за теплый период

Таблица 3.2.1 – Средние многолетние значения температуры за теплый период в бассейне Нижней Тунгуски.

№	Пункт/Станция	Месяцы					$t_{п}, ^\circ\text{C}$	$t_{пер}, ^\circ\text{C}$
		V	VI	VII	VIII	IX		
1	Большой Порог	0,4	9,5	15,3	11,9	5,0	3,5	3,8
2	Ногинский Рудник	1,5	10,6	15,7	12,1	5,1	3,8	
3	Кочумдек	1,4	10,1	15,3	11,6	4,5	3,6	
4	Тутончаны	1,8	10,6	15,7	11,9	4,9	3,7	
5	Виви	3,3	11,8	16,3	12,5	4,8	4,1	
6	Кислокан	2,8	12,0	15,4	11,8	3,8	3,8	
7	Кербо	3,3	11,7	15,2	11,8	4,5	3,9	

Для расчета среднемноголетнего значения температуры за теплый период было взято 7 станций, равномерно удаленных друг от друга. В данном бассейне данное значение составляет 3,8 °С и является наименьшим среди всех рассматриваемых водосборов. Максимальные температуры воздуха приходятся на июль месяцы по своим значениям мало отличаются от станции к станции.

Таблица 3.2.2 – Средние многолетние значения температуры за теплый период в бассейне Подкаменной Тунгуски.

№	Пункт/Станция	Месяцы					$t_{п}$ , °С	$t_{п\text{ ср}}$ , °С
		V	VI	VII	VIII	IX		
1	Кузьмовка	2,7	11,2	15,4	12,6	5,6	4,0	4,4
2	Полигус	3,7	12,2	16,6	13,0	5,5	4,3	
3	Перевалочная База	3,4	12,3	17,1	13,6	6,4	4,4	
4	Усть-Камо	4,8	13,2	16,8	13,0	5,4	4,4	
5	Ванавара	4,6	13,5	17,1	13,3	5,7	4,5	
6	Таимба	4,8	13,2	16,8	13,1	5,6	4,5	
7	Подкаменная Тунгуска	4,5	13,2	17,6	14,2	7,4	4,7	

В таблице 3.2.2 представлены температуры воздуха за теплый период, измеренные на 7 станциях бассейна Подкаменной Тунгуски. Как и в бассейне Нижней Тунгуски, максимальные температуры наблюдались в июне, однако их диапазон для данного месяца несколько увеличился: от 15,4 °С в устьевой части до 17,6 °С в истоках. Среднее многолетнее значение для всего бассейна составило 4,4 °С.

Таблица 3.2.3 – Средние многолетние значения температуры за теплый период в бассейне реки Ангара.

№	Пункт/Станция	Месяцы					$t_{п}$ , °С	$t_{п\text{ ср}}$ , °С
		V	VI	VII	VIII	IX		
1	Кежма	6,0	14,7	18,4	14,8	7,2	5,1	5,3
2	Чадобец	6,9	15,2	19,6	16,0	8,5	5,5	
3	Климино	6,7	15,6	18,7	15,5	8,0	5,4	
4	Каменка	6,0	14,5	18,0	14,5	7,3	5,0	
5	Богучаны	7,0	15,7	19,0	15,5	8,2	5,5	
6	Мотыгино	6,3	14,8	18,3	15,1	8,0	5,2	
7	Рыбное-на-Ангаре	6,4	15,0	18,8	15,4	8,5	5,3	

Минимальная среднемесячная температура в данном бассейне на нескольких постах наблюдается в мае и составляет 6,0 °С. Максимальные же температуры отмечаются ближе к истокам Ангары в июле. Так, на станциях Чадобец и Богучаны, расположенных на юго-востоке бассейна,

данные температуры составляют 19,6 и 19,0 °С соответственно. Среднемноголетнее значение для данного водосбора составило 5,3 °С.

Таблица 3.2.4 – Средние многолетние значения температуры за теплый период для левобережных станций Нижнего Енисея.

№	Пункт/Станция	Месяцы							t <sub>п</sub> , °С	t <sub>ср</sub> , °С
		IV	V	VI	VII	VIII	IX	X		
1	Богунай	-	7,3	14,9	18,0	14,6	8,1	-	5,2	5,6
2	Столбы	1,7	9,2	16,5	19,6	16,4	9,7	1,6	6,2	
3	Старики	-	8,5	15,1	18,1	15,2	8,7	0,8	5,5	
4	Верхний Сисим	2,9	10,6	17,0	20,3	17,2	10,3	2,1	6,5	
5	Тюхтят	2,2	8,8	14,6	17,9	15,8	9,9	1,1	5,8	
6	Буйба	1,9	9,5	15,0	17,8	15,5	8,9	0,3	5,7	
7	Усть-Уй	2,2	9,9	16,3	19,3	16,7	10,0	1,7	6,2	
8	Усть-Кизас	1,2	8,9	14,8	17,2	14,8	8,4	0,8	5,5	5,6
9	Матур	-	7,8	14,2	16,9	14,2	7,7	-	5,1	
10	Тозан	-	5,4	12,0	14,6	11,8	4,9	-	4,1	
11	Усть-Ужеп	2,6	10,1	16,0	18,9	16,4	10,1	2,0	6,2	

Для данного района было выбрано 10 станций, равномерно распределенных по территории всего бассейна. В низовьях Енисея температура воздуха принимала наименьшие значения. В частности, на станциях Игарка и Советская Речка среднемесячная температура в июле составила 14,8 °С и 14,7 °С соответственно. Далее, выше по течению, ее значения увеличиваются: на станции Ярцево средняя месячная температура для июля составляет уже 18,1 °С. Среднемноголетнее значение для всего бассейна составило 4,2 °С.

Таблица 3.2.5 – Средние многолетние значения температуры за теплый период в бассейне Верхнего Енисея.

№	Пункт/Станция	Месяцы							t <sub>п</sub> , °С	t <sub>ср</sub> , °С
		IV	V	VI	VII	VIII	IX	X		
1	Богунай	-	7,3	14,9	18,0	14,6	8,1	-	5,2	5,6
2	Столбы	1,7	9,2	16,5	19,6	16,4	9,7	1,6	6,2	
3	Старики	-	8,5	15,1	18,1	15,2	8,7	0,8	5,5	

4	Верхний Сисим	2,9	10,6	17,0	20,3	17,2	10,3	2,1	6,5
5	Тюхтяг	2,2	8,8	14,6	17,9	15,8	9,9	1,1	5,8
6	Буйба	1,9	9,5	15,0	17,8	15,5	8,9	0,3	5,7
7	Усть-Уй	2,2	9,9	16,3	19,3	16,7	10,0	1,7	6,2
8	Усть-Кизас	1,2	8,9	14,8	17,2	14,8	8,4	0,8	5,5
9	Матур	-	7,8	14,2	16,9	14,2	7,7	-	5,1
10	Тозан	-	5,4	12,0	14,6	11,8	4,9	-	4,1
11	Усть-Ужеп	2,6	10,1	16,0	18,9	16,4	10,1	2,0	6,2

Бассейн Верхнего Енисея расположен южнее всех ранее рассмотренных. Именно поэтому для данной территории среднее многолетнее значение температуры воздуха составляет 5,6 °С, что является наибольшим среди всех отдельно взятых бассейнов Енисея.

### 3.3 Расчет значений испаряемости по методике М.И Будыко

Таблица 3.3.1 – Значения испаряемости по методике М.И. Будыков бассейне Нижней Тунгуски.

№	Пункт/Станция	$E_0$	$E_0$ ср
Нижняя Тунгуска			
1	Большой Порог	362	399
2	Ногинский Рудник	399	
3	Кочумдек	374	
4	Тутончаны	387	
5	Виви	435	
6	Кислокан	399	
7	Кербо	411	

Примечание: в данной таблице и во всех последующих, значения  $E_0$  ср и  $E_{ср}$  для всех рассматриваемых бассейнов рассчитаны с использованием средних для каждой территории осадков и температуры.

Испаряемость – это максимально возможное испарение при заданных метеорологических условиях с достаточно увлажненной подстилающей поверхности. Для данного бассейна среднее значение нормы испаряемости составило 399 миллиметров.

Таблица 3.3.2 – Значения испаряемости по методике М.И. Будыко в бассейне Подкаменной Тунгуски.

№	Пункт/Станция	$E_0$	$E_0$ ср
Подкаменная Тунгуска			
1	Кузьмовка	423	470
2	Полигус	459	
3	Перевалочная База	470	
4	Усть-Камо	470	
5	Ванавара	482	
6	Таимба	482	
7	Подкаменная Тунгуска	504	

Для бассейна Подкаменной Тунгуски среднее значение испаряемости с подстилающей поверхности составило 470 миллиметров, что значительно больше испаряемости в бассейне Нижней Тунгуски.

Таблица 3.3.3 – Значения испаряемости по методике М.И. Будыко в бассейне реки Ангара.

№	Пункт/Станция	$E_0$	$E_0$ ср
Ангара			
1	Кежма	547	568
2	Чадобец	589	
3	Климино	579	
4	Каменка	537	
5	Богучаны	589	
6	Мотыгино	558	
7	Рыбное-на-Ангаре	568	

На всех выбранных станциях значение нормы испаряемости колеблется в пределах от 537 до 589 миллиметров. Среднее же значение в данном районе составило 568 миллиметров.

Таблица 3.3.4 – Значения испаряемости по методике М.И. Будыко на левобережных станциях Нижнего Енисея.

№	Пункт/Станция	$E_0$	$E_0$ ср
Левый берег Енисея			
1	Янов Стан	337	447
2	Верещагино	411	
3	Келлог	447	
4	Советская Речка	317	
5	Игарка	328	
6	Александровский Шлюз	531	
7	Ворогово	522	
8	Сым	525	
9	Климино	538	
10	Ярцево	532	

В северной части бассейна значения испаряемости принимают наименьшие значения: 317 миллиметров на станции Советская речка и 328 миллиметров на станции Игарка. К югу температура постепенно увеличивается, что приводит к увеличению значения испаряемости – на станции Климино оно составляет 538 миллиметров. Средняя норма испаряемости для всего бассейна – 447 миллиметров.

Таблица 3.3.5 - Значения испаряемости по методике М.И. Будыков бассейне Верхнего Енисея.

№	Пункт/Станция	$E_0$	$E_0$ ср
Верхний Енисей			
1	Богунай	562	599
2	Столбы	660	
3	Старики	592	
4	Верхний Сисим	685	
5	Тюхтят	619	
6	Буйба	613	
7	Усть-Уй	657	
8	Усть-Кизас	590	
9	Матур	544	
10	Тозан	430	
11	Усть-Ужеп	657	

Для данной территории средняя норма испаряемости составляет 599 миллиметров, что является наибольшим значением среди всех рассматриваемых бассейнов. Это обусловлено тем, что Верхний Енисей расположен намного южнее и, как следствие, температуры здесь намного выше. Максимальное значение испаряемости отмечается в пункте Усть-Уй и составляет 657 миллиметров.

### 3.4 Расчет значений испаряемости по методике А.Н. Постникова

Таблица 3.4.1 – Значения испаряемости по методике А.Н. Постникова в бассейне Нижней Тунгуски.

№	Пункт/Станция	$E_0$	$E_0$ ср
Нижняя Тунгуска			
1	Большой Порог	267	296
2	Ногинский Рудник	296	
3	Кочумдек	277	
4	Тутончаны	287	
5	Виви	324	
6	Кислокан	296	
7	Кербо	306	

Максимальное значение испаряемости в данном бассейне составило 324 миллиметров в пункте Виви. Минимальное же значение наблюдается на станции Большой Порог и составляет 267 миллиметров. Средняя норма испаряемости для рассматриваемого бассейна оказалась равной 296 миллиметрам.



Таблица 3.4.2 – Значения испаряемости по методике А.Н. Постникова в бассейне Подкаменной Тунгуски.

№	Пункт/Станция	$E_0$	$E_0$ ср
Подкаменная Тунгуска			
1	Кузьмовка	315	352
2	Полигус	343	
3	Перевалочная База	352	
4	Усть-Камо	352	
5	Ванавара	361	
6	Таимба	361	
7	Подкаменная Тунгуска	379	

Среднее значение нормы испаряемости составляет 352 миллиметра на рассматриваемой территории. Ее значение мало изменяется от станции к станции – от 315 в центральной части бассейна до 379 и 361 миллиметров в западной и восточной частях.

Таблица 3.4.3 – Значение испаряемости по методике А.Н. Постникова в бассейне реки Ангара.

№	Пункт/Станция	$E_0$	$E_0$ ср
Ангара			
1	Кежма	414	431
2	Чадобец	448	
3	Климино	440	
4	Каменка	405	
5	Богучаны	448	
6	Мотыгино	423	
7	Рыбное-на-Ангаре	431	

В таблице 3.4.3 среднее значение нормы испаряемости составило 431 миллиметр. На протяжении всей территории испаряемость, как и в бассейне Подкаменной Тунгуски мало подвержена изменению и колеблется в диапазоне от 405 до 448 миллиметров.

Таблица 3.4.4 – Значения испаряемости по методике А.Н. Постникова на левобережных станциях Нижнего Енисея.

№	Пункт/Станция	$E_0$	$E_0$ ср
Левый берег Енисея			
1	Янов Стан	248	334
2	Верещагино	306	
3	Келлог	334	
4	Советская Речка	233	
5	Игарка	241	
6	Александровский Шлюз	400	
7	Ворогово	393	
8	Сым	396	
9	Климино	406	
10	Ярцево	402	

На территории левого берега Нижнего Енисея средняя норма испаряемости составила 334 миллиметра.

Таблица 3.4.5 – Значения испаряемости по методике А.Н. Постникова в бассейне Верхнего Енисея.

№	Пункт/Станция	$E_0$	$E_0$ ср
Верхний Енисей			
1	Богунай	426	456
2	Столбы	507	
3	Старики	451	
4	Верхний Сисим	529	
5	Тюхтят	473	
6	Буйба	468	
7	Усть-Уй	505	
8	Усть-Кизас	449	
9	Матур	411	
10	Тозан	320	
11	Усть-Ужеп	505	

Наибольшее значение испаряемости наблюдается в пункте Верхний Сисим – 529 миллиметров. Самое небольшое ее значение составляет 320 миллиметров в пункте Тозан на Большом Енисее. Средняя норма испаряемости всего бассейна – 456 миллиметров.

### 3.5 Расчет значений испарения по методике М.И. Будыко

Таблица 3.5.1 – Значения испарения по методике М.И. Будыко в бассейне Нижней Тунгуски.

№	Пункт/Станция	<i>E</i>	<i>E</i> <sub>ср</sub>
Нижняя Тунгуска			
1	Большой Порог	284	313
2	Ногинский Рудник	314	
3	Кочумдек	306	
4	Тутончаны	320	
5	Виви	295	
6	Кислокан	247	
7	Кербо	284	

В бассейне Нижней Тунгуски расположены 7 станций, на основе которых рассчитаны значения испарений. Так, минимальное значение отмечается на станции Кислокан– 247 миллиметров. Максимальное же значение составляет 320 миллиметров на станции Тутончаны. Стоит отметить, что значение для данной территории является наименьшим среди всех бассейнов.

Таблица 3.5.2 – Значения испарения по методике М.И. Будыко в бассейне Подкаменной Тунгуски.

№	Пункт/Станция	<i>E</i>	<i>E</i> <sub>ср</sub>
Подкаменная Тунгуска			
1	Кузьмовка	353	361
2	Полигус	349	
3	Перевалочная База	381	
4	Усть-Камо	321	
5	Ванавара	333	
6	Таимба	314	
7	Подкаменная Тунгуска	394	

Средняя норма испарения с бассейна Подкаменной Тунгуски составляет 361 миллиметр. Ближе к центральной части бассейна и устью

реки испарение составляет наибольшую величину – 394 миллиметра в устье и 381 в центральной части.

Таблица 3.5.3 –Значения испарения по методике М.И. Будыко в бассейне реки Ангара.

№	Пункт/Станция	<i>E</i>	<i>E</i> <sub>ср</sub>
Ангара			
1	Кежма	300	376
2	Чадобец	308	
3	Климино	348	
4	Каменка	353	
5	Богучаны	357	
6	Мотыгино	387	
7	Рыбное-на-Ангаре	396	

Средняя годовая норма испарения для бассейна реки Ангара составляет 376 миллиметров по данным 7 станций. Только на двух из них (Мотыгино и Рыбное-на-Ангаре) величина испарения превышает среднюю. Минимальное же значение отмечается на станции Кежма: здесь оно составляет 300 миллиметров.

Таблица 3.5.4 – Значения испарения по методике М.И. Будыко на левобережных станциях Нижнего Енисея.

№	Пункт/Станция	<i>E</i>	<i>E</i> <sub>ср</sub>
Левый берег Енисея			
1	Янов Стан	285	356
2	Верещагино	342	
3	Келлог	344	
4	Советская Речка	264	
5	Игарка	289	
6	Александровский Шлюз	384	
7	Ворогово	408	
8	Сым	377	
9	Климино	422	
10	Ярцево	407	

Значения испарения на всех 10-ти станциях значительно отличаются. Если на станциях, расположенных севернее, испарение составляет 264-285 миллиметров, то в южной части бассейна данная величина составляет 407-408 миллиметров. Для всей же рассмотренной территории среднегодовая норма по методу Будыко– 356 миллиметров.

Таблица 3.5.5 – Значения испарения по методике М.И. Будыко в бассейне Верхнего Енисея.

№	Пункт/Станция	<i>E</i>	<i>E</i> <sub>ср</sub>
Верхний Енисей			
1	Богунай	390	442
2	Столбы	466	
3	Старики	434	
4	Верхний Сисим	512	
5	Тюхтят	436	
6	Буйба	501	
7	Усть-Уй	454	
8	Усть-Кизас	495	
9	Матур	420	
10	Тозан	299	
11	Усть-Ужеп	378	

Сравнивая полученное значение среднегодовой нормы испарения с значениями для других бассейнов, можно отметить, что для территории Верхнего Енисея данная величина является наибольшей – 442 миллиметра. Минимальное испарение приходится на станцию Тозан – всего 299 миллиметров, в то время как на станции Верхний Сисим оно составляет максимальное его значение – 512 миллиметров.

### 3.6 Расчет значений испарения по методике А.Н. Постникова

Таблица 3.6.1 –Значения испарения по методике А.Н. Постникова в бассейне Нижней Тунгуски.

№	Пункт/Станция	<i>E</i>	<i>E</i> <sub>ср</sub>
Нижняя Тунгуска			
1	Большой Порог	259	287
2	Ногинский Рудник	287	
3	Кочумдек	273	
4	Тутончаны	283	
5	Виви	284	
6	Кислокан	240	
7	Кербо	272	

Среднегодовая норма испарения для бассейна Нижней Тунгуски при расчете по данной методике составляет 287 миллиметров. Полученная величина на 26 миллиметров отличается от той, которую мы получили при расчете по другой методике.

Таблица 3.6.2 –Значения испарения по методике А.Н. Постникова в бассейне Подкаменной Тунгуски.

№	Пункт/Станция	<i>E</i>	<i>E</i> <sub>ср</sub>
Подкаменная Тунгуска			
1	Кузьмовка	312	337
2	Полигус	326	
3	Перевалочная База	345	
4	Усть-Камо	310	
5	Ванавара	321	
6	Таимба	306	
7	Подкаменная Тунгуска	365	

По методике А.Н. Постникова среднее многолетнее значение испарения для данного бассейна составило 337 миллиметров. При сравнении данного значения с полученным ранее (по методике Будыко) отмечается расхождение на 24 миллиметра.

Таблица 3.6.3 – Значение испарения по методике А.Н. Постникова в бассейне реки Ангара.

№	Пункт/Станция	<i>E</i>	<i>E</i> <sub>ср</sub>
Ангара			
1	Кежма	297	368
2	Чадобец	306	
3	Климино	344	
4	Каменка	344	
5	Богучаны	352	
6	Мотыгино	375	
7	Рыбное-на-Ангаре	384	

Для бассейна реки Ангара расхождение между полученными по двум методикам значениям среднемноголетнего испарения составляет всего 8 миллиметров (368 миллиметров по методике Постникова и 376 миллиметров по методике Будыко).

Таблица 3.6.4 –Значения испарения по методике А.Н. Постникова на левобережных станциях Нижнего Енисея.

№	Пункт/Станция	<i>E</i>	<i>E</i> <sub>ср</sub>
Левый берег Енисея			
1	Янов Стан	247	325
2	Верецагино	303	
3	Келлог	319	
4	Советская Речка	231	
5	Игарка	241	
6	Александровский Шлюз	368	
7	Ворогово	379	
8	Сым	362	
9	Климино	392	
10	Ярцево	382	

Среднемноголетнее значение нормы испарения для бассейна Нижнего Енисея составляет 325 миллиметров. Разница в значениях данной величины,

рассчитанной по двум методикам, составляет 31 миллиметр. Расхождение для данной территории является наибольшим.

Таблица 3.6.5 –Значения испарения по методике А.Н. Постникова в бассейне Верхнего Енисея.

№	Пункт/Станция	Е	Е <sub>ср</sub>
Верхний Енисей			
1	Богунай	379	423
2	Столбы	455	
3	Старики	417	
4	Верхний Сисим	493	
5	Тюхтят	424	423
6	Буйба	460	
7	Усть-Уй	444	
8	Усть-Кизас	445	
9	Матур	393	
10	Тозан	287	
11	Усть-Ужеп	376	

При расчете средней многолетней нормы испарения по данной методике получено значение 423 миллиметра. Сравнив данный результат с тем, который мы получили применяя методику Будыко можно сказать о том, что расхождение между значениями достаточно мало – 19 миллиметров.

### 3.7 Итоги расчетов испарения и стока по различным методикам и их сравнение

Таблица 3.7 –Исходные данные и результаты расчетов.

	Нижняя Тунгуска	Подкаменная Тунгуска	Ангара	Левый берег Енисея	Верхний Енисей
$t_{п}$	3,8	4,4	5,3	4,2	5,6
$X$	534	596	518	626	686
$E_1$	313	361	376	356	442



$E_2$	287	337	368	325	423
$y_1$	221	235	142	270	244
$y_2$	247	259	150	301	263
$y_{\text{факт}}$	245	230	171	295	267
$\Delta_1$	-24	5	-29	-25	-23
$\Delta_2$	2	29	-21	6	-4
$\delta_1 \%$	8	2	17	8	9
$\delta_2 \%$	1	13	12	2	1

Проведя анализ полученных результатов можно сказать следующее: обе методики дают для данной территории удовлетворительные результаты. Для некоторых бассейнов наиболее точной оказалась методика А.Н. Постникова: относительная погрешность составила 1% для Нижней Тунгуски (2 миллиметра), 2% для левого берега (6 миллиметров) и 1% для Верхнего Енисея (4 миллиметра). В то же время, для Подкаменной Тунгуски и Ангары данная методика показала более неточные результаты: здесь относительная погрешность составляет 13 и 12% соответственно. Однако, для бассейна реки Ангара еще более неточными оказались расчеты по методике Будыко – относительная погрешность здесь составила 17% (29 миллиметров). Для территории же Подкаменной Тунгуски погрешность при данной методике является наименьшей – 2% (5 миллиметров от нормы стока). В бассейнах Нижней Тунгуски и левого берега Нижнего Енисея погрешности составляют по 8% - 24 и 25 миллиметров соответственно, а для Верхнего Енисея – 9% (23 миллиметра).

Обе методики показали удовлетворительные результаты. Нормы годового стока для всех бассейнов близки к своим фактическим значениям. Следовательно, можно сказать, что данным методикам можно доверять.

### 3.8 Расчет значений стока при заданных изменениях температуры воздуха и атмосферных осадков (методика М.И. Будыко)

Таблица 3.8.1 – Значения стока при заданных изменениях осадков и температуры воздуха в бассейне Нижней Тунгуски (методика Будыко).

Y (сток), мм Бассейн Нижней Тунгуски			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	234	200	174
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	256	221	193
$t + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	279	243	213
Значение нормы стока при изменении осадков и температуры воздуха на вышеуказанные величины (мм).			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	260	222	193
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	284	245	214
$t + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	310	270	236
Y (сток), %			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	106	91	79
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	116	100	87
$t + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	126	110	96

В бассейне реки Нижняя Тунгуска средняя многолетняя температура воздуха за теплый период изменится на 0,2 градуса. Данная величина рассчитана следующим способом: количество месяцев теплого периода (в данном бассейне оно составляет 5) умножается на изменение величины  $t(0,5^\circ\text{C})$ , а затем делится на 12 – количество месяцев в году. Рассчитанное по данной методике значение нормы стока составляет 221 миллиметр. Фактическое же значение для водосбора составило 245 миллиметров. Отклонение  $\sigma$  составляет для данного бассейна 1,109 ( $\sigma = Y_{\text{факт}}/Y_{\text{расч}}$ ). Умножая данное отклонение на значения норм стока, переходим к стоку, выраженному в процентах.

Таблица 3.8.2 – Значения стока при заданных изменениях осадков и температуры воздуха в бассейне Подкаменной Тунгуски (методика Будыко).

Y (сток), мм Бассейн Подкаменной Тунгуски			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	241	212	188

$t$ °C	265	235	210
$t + 0,5$ °C	290	258	232
Значение нормы стока при изменении осадков и температуры воздуха на вышеуказанные величины (мм).			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5$ °C	236	208	184
$t$ °C	260	230	206
$t + 0,5$ °C	284	253	227
Y (сток), %			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5$ °C	103	90	80
$t$ °C	113	100	89
$t + 0,5$ °C	124	110	99

В бассейне Подкаменной Тунгуски среднемноголетняя температура за каждый месяц теплого периода изменится также на 0,2 градуса. Фактическое значение стока составляет 230 миллиметров, в то время как рассчитанное по методике Будыко значение стока составило 235 миллиметров, что представляет собой достаточно хороший результат. Отклонение, с помощью которого произведен перерасчет стока в проценты, составляет 0,979.

Таблица 3.8.3 – Значения стока при заданных изменениях осадков и температуры воздуха в бассейне реки Ангара (методика Будыко).

Y (сток), мм Бассейн Ангара			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5$ °C	143	126	112
$t$ °C	160	142	127
$t + 0,5$ °C	177	158	142
Значение нормы стока при изменении осадков и температуры воздуха на вышеуказанные величины (мм).			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5$ °C	172	151	134
$t$ °C	192	171	152
$t + 0,5$ °C	212	190	170
Y (сток), %			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5$ °C	101	89	79

$t\text{ }^{\circ}\text{C}$	113	100	90
$t + 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	125	112	100

Для бассейна реки Ангара характерно изменение средней многолетней температуры за каждый месяц теплого периода на 0,2 градуса. Отклонение составило 1,204, в то время как фактическое значение составляет 171 миллиметр, а рассчитанное по методике – 142 миллиметра. Самое большое увеличение стока (на 25%) произойдет в данном бассейне при увеличении температуры (на 0,5 $^{\circ}\text{C}$ ) и уменьшении осадков (на 5%).

Таблица 3.8.4 – Значения стока при заданных изменениях осадков и температуры воздуха в бассейне левого берега Нижнего Енисея (методика Будыко).

Y (сток), мм			
Левый берег Нижнего Енисея			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	278	245	218
$t\text{ }^{\circ}\text{C}$	305	270	242
$t + 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	332	296	266
Значение нормы стока при изменении осадков и температуры воздуха на вышеуказанные величины (мм).			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	303	267	238
$t\text{ }^{\circ}\text{C}$	332	295	264
$t + 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	362	323	290
Y (сток), %			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	103	91	81
$t\text{ }^{\circ}\text{C}$	113	100	89
$t + 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	123	110	98

Для рассматриваемого водосбора фактическое значение нормы стока составляет 295 миллиметров, а рассчитанное по методике – 270 миллиметров, что на 25 миллиметров меньше фактического. Отклонение составило 1,093. Средняя многолетняя температура за каждый месяц в данном бассейне изменится также на 0,2 градуса.

Таблица 3.8.5 – Значения стока при заданных изменениях осадков и температуры воздуха в бассейне Верхнего Енисея (методика Будыко).

Y (сток), мм Бассейн Верхнего Енисея			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	241	219	200
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	266	243	223
$t + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	293	269	248
Значение нормы стока при изменении осадков и температуры воздуха на вышеуказанные величины (мм).			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	265	241	220
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	293	267	245
$t + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	322	296	273
Y (сток), %			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	99	90	82
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	110	100	92
$t + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	120	110	102

Для бассейна Верхнего Енисея характерно наибольшее изменение среднесуточной температуры за каждый месяц теплого периода – на 0,3 градуса. Фактическая норма стока для водосбора составила 267 миллиметров, в то время как полученное по методике значение – 243 миллиметра. Отклонение, полученное для дальнейшего перерасчета в проценты, составило 1,099. Наибольшее значение нормы стока – 322 миллиметра, при уменьшении температуры и осадков, а наименьшее – 220 миллиметров, при уменьшении температуры и увеличении осадков.

3.9 Расчет значений стока при заданных изменениях температуры воздуха и атмосферных осадков (методика А.Н. Постникова)

Таблица 3.9.1 – Значения стока при заданных изменениях осадков и температуры воздуха в бассейне Нижней Тунгуски (методика Постникова).

Y (сток), мм			
Бассейн Нижней Тунгуски			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	264	223	191
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	289	247	213
$t + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	315	272	235
Значение нормы стока при изменении осадков и температуры воздуха на вышеуказанные величины (мм).			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	261	221	189
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	286	245	211
$t + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	312	269	233
Y (сток), %			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	107	90	77
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	117	100	86
$t + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	127	110	95

Таблица 3.9.2 – Значения стока при заданных изменениях осадков и температуры воздуха в бассейне Подкаменной Тунгуски (методика А.Н. Постникова).

Y (сток), мм			
Бассейн Подкаменной Тунгуски			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	269	234	204
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	297	259	228
$t + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	325	286	253
Значение нормы стока при изменении осадков и температуры воздуха на вышеуказанные величины (мм).			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	239	208	182
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	264	230	203
$t + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	289	255	225
Y (сток), %			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	104	90	79
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	114	100	88

$t+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	125	110	97
---------------------------------	-----	-----	----

Таблица 3.9.3 - Значения стока при заданных изменениях осадков и температуры воздуха в бассейне реки Ангара (методика А.Н. Постникова).

Y (сток), мм Бассейн Ангары			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	153	133	116
$t\text{ }^{\circ}\text{C}$	172	150	132
$t+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	192	168	148
Значение нормы стока при изменении осадков и температуры воздуха на вышеуказанные величины (мм).			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	174	152	132
$t\text{ }^{\circ}\text{C}$	196	171	150
$t+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	219	192	169
Y (сток), %			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	102	89	78
$t\text{ }^{\circ}\text{C}$	115	100	82
$t+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	128	112	99

Таблица 3.9.4 –Значения стока при заданных изменениях осадков и температуры воздуха в бассейне левого берега Нижнего Енисея (методика А.Н. Постникова).

Y (сток), мм Левый берег Нижнего Енисея			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	312	273	239
$t\text{ }^{\circ}\text{C}$	342	301	266
$t+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	373	330	293
Значение нормы стока при изменении осадков и температуры воздуха на вышеуказанные величины (мм).			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	306	268	234
$t\text{ }^{\circ}\text{C}$	335	295	261
$t+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	332	323	287

Y (сток), %			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	104	90	79
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	114	100	88
$t + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	124	110	97

Таблица 3.9.5 – Значения стока при заданных изменениях осадков и температуры воздуха в бассейне Верхнего Енисея (методика А.Н. Постникова).

Y (сток), мм Бассейн Верхнего Енисея			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	262	234	211
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	291	262	236
$t + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	321	290	263
Значение нормы стока при изменении осадков и температуры воздуха на вышеуказанные величины (мм).			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	267	239	215
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	297	267	241
$t + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	327	296	268
Y (сток), %			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	100	89	81
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	111	100	90
$t + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	123	111	101

3.10 Подведение выводов об изменении норм стока в бассейне реки Енисей – г. Игарка

Таблица 3.10.1 – Изменение стока в бассейне р. Енисей – г. Игарка при изменении температуры воздуха и атмосферных осадков (методика Будыко).

Y (сток), мм
--------------



	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	254	224	199
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	281	249	222
$t + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	309	276	247
Y (сток), %			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	102	90	80
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	113	100	89
$t + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	124	111	99

Таблица 3.10.2 – Изменение стока в бассейне р. Енисей – г. Игарка при изменении температуры воздуха и атмосферных осадков (методика Постникова).

Y (сток), мм			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	259	224	197
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	286	249	217
$t + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	314	276	244
Y (сток), %			
	$\bar{X} - 0,05 \bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X} + 0,05 \bar{X}$
$t - 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	104	90	79
$t \text{ } ^\circ\text{C}$	115	100	87
$t + 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	126	111	98

По результатам расчета норм стока в бассейне р. Енисей при возможных изменениях климата можно сделать выводы по каждой отдельно взятой методике:

#### 1. Методика М.И. Будыко

Изменение температуры на  $0,5^\circ\text{C}$  (как в сторону уменьшения, так и в сторону ее увеличения) при неизменной норме осадков приведет либо к снижению нормы стока на 10% (при увеличении температуры), либо к ее росту на 11% (при уменьшении).

В тоже время, если температура воздуха не будет подвержена изменениям, а норма осадков снизится или увеличится на 5%, то данные климатические перемены приведут к еще более сильным изменениям стока: на 13% при уменьшении осадков и на 11% при увеличении их нормы.

Наибольший скачок нормы стока будет наблюдаться при одновременном повышении температуры и уменьшении количества осадков – на 24%, а сама норма стока будет составлять 309 миллиметров. При обратных же климатических условиях (уменьшение среднемноголетней температуры и увеличение нормы осадков) сток снизится на 20% и будет составлять 199 миллиметров.

## 2. Методика А.Н. Постникова

Результаты расчета изменений норм стока для бассейна р. Енисей – г. Игарка по методике А.Н. Постникова оказались достаточно схожими с результатами, полученными по методике М.И. Будыко. Так, при неизменной норме осадков, норма стока также снизилась на 10% при уменьшении температуры воздуха и повысилась на 11% при ее увеличении.

При сохранении данной температуры воздуха, норма стока сильно увеличивается со снижением нормы осадков – на 15% и значительно уменьшается при ее повышении – на 13%.

Своего максимального значения норма стока достигает при одновременном повышении температуры воздуха и снижении нормы осадков – 314 миллиметров, что характерно понижением на 26%. Вместе с тем, при обратных климатических условиях (понижение температуры и увеличение нормы осадков) норма стока снижается до 197 миллиметров, что в процентном содержании характеризуется снижением на 21%.

## Заключение

В выпускной квалификационной работе проведено исследование о том, как может изменяться сток больших рек при возможных изменениях климата. В работе не использовались результаты прогноза климатических характеристик по какому-либо сценарию изменения климата, которых в настоящее время накопилось уже достаточно много, а предполагалось, что происходят изменения норм температуры воздуха и осадков и задавались достаточно небольшие величины этих изменений. При этом допускалось, что изменения как температуры, так и осадков могут происходить как в сторону их увеличения, так и в сторону уменьшения. Для решения этой задачи использовались уравнения связи М.И. Будыко и полученное на кафедре гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ. Испаряемость и радиационный баланс увлажненной поверхности, необходимые при расчете испарения по этим уравнениям, определялись по формулам, также полученных на названной кафедре.

Объектом исследований был выбран бассейн реки Енисей, который был разделен на пять частей (водосборов). Для каждого из водосборов сначала по обоим уравнениям рассчитывалась норма испарения по данным о годовых нормах осадков и о средних температурах за месяцы теплого периода года и, затем определялся речной сток по уравнению водного баланса, как разность между осадками и испарением.

Сравнение рассчитанных значений стока с измеренными, приведенными в ОГХ, показало, что если осреднять относительные погрешности определения стока по пяти бассейнам, то при использовании первого уравнения связи (Будыко) средняя относительная погрешность составляет 9% (нормы стока в среднем занижаются на 9%), а при использовании второго уравнения нормы стока занижаются на 5%.

Наибольшие увеличения норм стока по частным бассейнам по сравнению с современными (норма осадков увеличивается на 5%, а норма температуры снижается на  $0,5^{\circ}\text{C}$ ) составят 20-25% от современных норм, чему соответствует увеличение слоев стока на 50-60 миллиметров, за исключением бассейна Ангары, где приращение стока в таком случае будет равно 35-40 миллиметров.

Наибольшее снижение норм стока по частным бассейнам (норма осадков уменьшается на 5%, норма температуры возрастает на  $0,5^{\circ}\text{C}$ ) будет, примерно, оцениваться в 20%, что соответствует уменьшению слоя стока на 45-55 миллиметров, за исключением бассейна Ангары, где оно составит 30-35 миллиметров.

В целом по бассейну р. Енисей –г. Игарка при заданных условиях сток может максимально увеличиться на 26%, а максимально снизиться на 15-20%.

Анализируя полученные результаты, можно прийти к выводу, что даже, казалось бы, незначительные изменения норм осадков ( $\pm 5\%$ ) и температуры ( $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ) могут приводить к достаточно большим изменениям норм речного стока. Можно сказать, что бассейны рек очень чутко реагируют на изменения климатических характеристик.

### Список используемой литературы

1. Будыко М.И. Испарение в естественных условиях. – Л.: Гидрометеиздат, 1948. – 136 с.
2. Методы изучения и расчёта водного баланса. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 387 с.
3. Постников А.Н. К оценке среднемноголетних значений суммарного испарения с поверхности суши на основе уравнений связи // Труды РГГМУ. – СПб. – 1999. – Вып. 123. – с. 141 – 152.
4. Постников А.Н. Формулы для расчета среднего годового испарения с поверхности суши и радиационного баланса увлажненной поверхности // Проблемы современной гидрологии. – СПб.: изд. РГГМУ, 2004 – с. 143 – 153.
5. Ресурсы поверхностных вод СССР. Вып. 1, том 16
6. Ресурсы поверхностных вод СССР. Вып. 2, том 16
7. Справочник по климату СССР. Температура воздуха и почвы. Вып. 21
8. Справочник по климату СССР. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. Вып. 21