



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

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему **Изменение испарения**
с поверхности суши в
Арктической зоне России под
влиянием изменений климата

Исполнитель Дубинин Валерий Константинович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель Кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Постников Александр Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

Кандидат технических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«27» 05 2024 г.

Санкт-Петербург
2024

Оглавление

Введение.....	3
1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ.....	4
1.1 Рельеф	4
1.2 Геологическое строение.....	7
1.3 Климат.....	11
1.4 Почвы	17
1.5 Растительность.....	19
2 МЕТОДЫ РАСЧЕТА СРЕДНЕМНОГОЛЕТНЕГО ИСПЕРНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ СУШИ.....	21
2.1 Способы определения испарения	21
2.2 Уравнения связи	23
3 РАСЧЕТ И АНАЛИЗ НОРМЫ СРЕДНЕГОДОВОГО ИСПАРЕНИЯ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИИ.....	36
3.1 Исходные данные.....	36
3.2 Нормы годовых осадков и температуры воздуха за теплый период.....	37
3.3 Нормы испарения.....	39
3.4 Вклады в изменения нормы испарения	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	44
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКВ	45

Введение

Объектом исследования в данной работе была выбрана Арктическая зона России. Эта зона расположена севернее северного полярного круга и занимает около 5 млн. км². Эта зона состоит из 9 административных единиц, 2 областей, 1 края, 3 республик и 3 автономных округов. На территории Арктической зоны России проживает около 2,5 млн человек.

В настоящее время мы живем в эпоху изменения климата. Заметное изменение климата началось в середине 70-х годов прошлого столетия. Прогноз климата не является задачей гидрологии, однако, гидрологи должны быть способны заблаговременно оценить изменения, хотя бы, норму испарения на той или иной территории.

Можно сказать, что изменение климата, по сути, есть изменение среднесуточных значений (норм) гидрометеорологических элементов. Опираясь на связь этих элементов (осадки, температура воздуха, испарение) в уравнении связи, в работе сделана оценка изменения нормы испарения при фактическом изменении климата за 2 периода, стационарный с 1931 года до 1960 года и не стационарный с 1986 года по 2015 год. Оценка этих изменений интересна и важна как с научной, так и практической точек зрения. В настоящей работе предпринята попытка оценки изменений средних многолетних значений испарения (далее просто «испарение») с поверхности суши, произошедших в конце прошлого и в начале настоящего столетий на территории материковой части Арктической зоны России (АЗР).

1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ

1.1 Рельеф

Рельеф этой зоны характеризуется разнообразием форм и типов поверхности. Здесь можно встретить как равнинные, так и горные ландшафты, а также различные формы ледникового рельефа (рисунок 1.1).

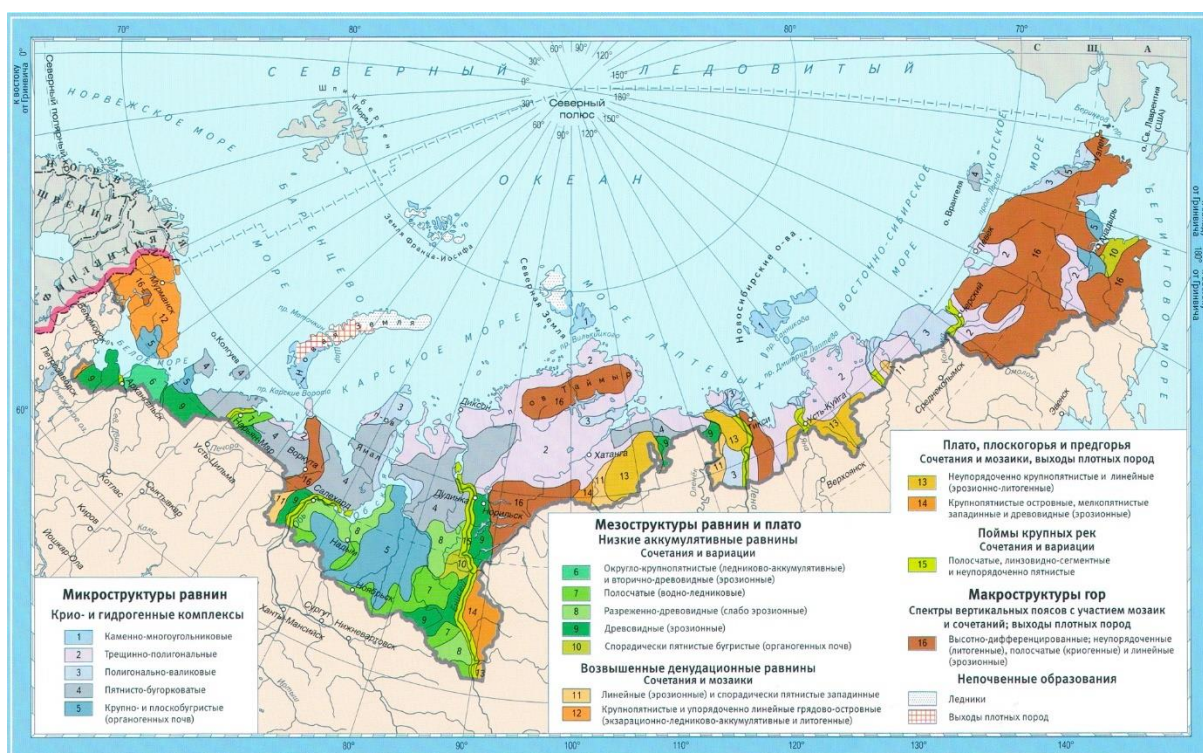


Рисунок 1.1 – Карта с распространением форм рельефа на территории Арктической зоны России

Одной из главных особенностей рельефа Арктической зоны является наличие вечной мерзлоты. Вечная мерзлота — это слой грунта, который остаётся в замороженном состоянии на протяжении многих лет. Она оказывает значительное влияние на формирование рельефа, создавая условия для развития таких форм, как термокарст, солифлюкция и пучение грунтов.

В Арктической зоне России можно выделить несколько основных типов рельефа:

– Равнинный рельеф. Равнины занимают большую часть территории Арктической зоны. Они характеризуются небольшими перепадами высот и относительно плоским рельефом. Среди равнинных ландшафтов можно выделить тундровые равнины, которые покрыты мхами, лишайниками и кустарниками. Также здесь встречаются болотистые равнины и озёрно-ледниковые низменности.

– Горный рельеф. Только в отдельных районах имеются горы; наиболее значительны горы Бырранга на Таймырском полуострове (высота до 1146 м), северная часть Верхоянского хребта, горы Чукотского полуострова. В пределах материковой части Сев. Америки наибольшую площадь занимают холмистые плоскогорья высотой 400—700 м (Арктическое плато и др.). Большинство островов Арктика — материкового происхождения, поверхность их преимущественно низкогорная и низменная. Наиболее высокие горы находятся на В. Гренландии (г. Гунбьёрн, 3700 м, — самая высокая вершина Арктика), на Баффиновой Земле (2591 м), о. Элсмир (2926 м).

– Ледниковый рельеф. Ледниковый рельеф представлен различными формами, такими как морены, кары, трог и ледниковые озёра. Морены — это скопления обломков горных пород, которые были перенесены ледником. Кары — это чашеобразные углубления на склонах гор, образованные под действием ледников. Трог — речная долина с корытообразным поперечным профилем, преобразованным горно-долинным ледником. Ледниковые озёра образуются в результате таяния ледников и заполнения водой образовавшихся впадин.

Также в Арктической зоне можно встретить такие формы рельефа, как фьорды, шхеры и риасовые берега. Фьорд — узкий, извилистый и глубоко врезающийся в сушу морской залив со скалистыми берегами. Шхеры —

архипелаг, состоящий из мелких скалистых островов, разделённых узкими проливами.

Поверхность материковой части Арктика образуют преимущественно низменные окраины Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин, Северо-Сибирская, Яно-Индигорская и Колымская низменности. Только в отдельных районах имеются горы; наиболее значительны горы Бырранга на Таймырском полуострове (высота до 1146 м), северная часть Верхоянского хребта, горы Чукотского полуострова.

Большую часть Арктика (около 13 млн. км²) занимает Северный Ледовитый океан. Здесь широко развита область шельфа с глубинами менее 200 м, занятая окраинными морями (Баренцево, Белое, Карское, море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское). Дно этих морей — подводное продолжение платформенных структур суши. Переходная зона представлена материковым склоном с глубинами 180—3000 м. Центральная часть океана — Арктический бассейн — область глубоководных котловин (глубина до 5449 м в котловине Нансена) и подводных хребтов, из которых наиболее значительным является хребет Ломоносова.

По особенностям рельефа в Арктике выделяют: шельф с островами материкового происхождения и прилегающими окраинами материков и Арктический бассейн. Область шельфа занята окраинными морями — Баренцевым, Карским, Лаптевых, Восточно-Сибирским и Чукотским. Рельеф суши российской Арктики преимущественно равнинный; местами, особенно на островах, гористый. Центральная часть — Арктический бассейн, область глубоководных котловин (до 5527 м) и подводных хребтов.

1.2 Геологическое строение

Арктическая зона России – наименее геологически изученная часть российского материкового шельфа, склона, и океанического дна. В связи с этим, изучение геологических особенностей Арктики вызывает интерес среди геологов. Геологическая характеристика включает изучение тектоники, стратиграфии и литологии. Особенно актуальным вопросом о геологической характеристике Арктической зоны России становится в связи с выделением международных секторов в Арктике, где присутствуют границы 5-ти государств: России, США, Канады, Норвегии и Дании. В настоящее время Исландия, Швеция и Финляндия также предъявили свои претензии на арктические территории. Кроме того, еще более 20-ти стран выразили готовность разрабатывать месторождения арктического шельфа. По данным геологов, под морским дном Арктики находится до четверти общемировых запасов нефти и природного газа. В связи с этим, геологическое строение и границы тектонических блоков арктической зоны России становятся политическими вопросами.

Океанические формы рельефа соответствуют тектоническим структурам. Определяются положительные и отрицательные формы рельефа. Положительным формам рельефа океана (срединно-океаническим хребтам, вулканическим островам, валам, поднятиям) соответствуют зоны спрединга (раздвижения литосферных плит). В этих зонах происходит излияние базальтовой лавы, которая быстро остывает в океанических водах и из нее вырастают срединно-океанические хребты. Вулканические острова – это выход срединноокеанического хребта выше уровня океана. Для зон спрединга характерна повышенная тектоническая активность, вулканизм, землетрясения, высокий тепловой поток, который в 5-7 раз больше, чем на абиссальных равнинах и материковых платформах.

Отрицательные формы рельефа океана (глубоководные желоба, подводные абиссальные равнины) участвуют в процессе субдукции, где происходит погружение океанического дна под материк. Глубоководным желобам соответствуют глубинные разломы зон субдукции. Они представляют собой вытянутые, узкие, глубочайшие рвы. В глубинных разломах имеется маломощный осадочный покров, образованный преимущественно турбидитными осадками, то есть осадками, возникающими под действием мутьевых потоков и подводных оползней. Зоны субдукции характеризуются низким тепловым потоком и отрицательными гравитационными аномалиями.

Островные вулканические дуги, представляющие собой цепочки вулканических островов над зоной субдукции, состоят из вулканов и сложены вулканическими породами преимущественно среднего (андезитового) состава, с продуктами их переотложения, и мелководными рифовыми известняками. Особо важной чертой островных вулканических дуг является их высокая сейсмичность.

Окраинные моря находятся в тылу вулканических островных дуг. Представляют собой глубокие котловины с океаническим типом коры, заполненные иногда мощными флишевыми осадками. Обладают повышенным тепловым потоком.

Структуры арктической зоны России включают в себя западный и восточный блоки.

Западный Евразийский блок, развивался синхронно с Восточно-Европейской платформой и ее арктическими окраинами, и не претерпел повсеместной складчатости. При относительно небольших размерах растяжения формировались обширные рифтовые впадины с мощными толщами осадочного чехла. Это: Центрально-Баренцевоморская и Южно-Карско-Ямальская зоны рифтогенеза, Печоро-Колвинский и Енисей-Хатангский рифты.

Их последующая инверсия не завершилась интенсивной складчатостью, а лишь послужила причиной формирования линейных валообразных поднятий, к которым относятся инверсионные валы центральной части Баренцева моря, Печорская синеклиза, Южно-Карская впадина и север Западной Сибири, а также Енисей-Хатангский прогиб. Инверсией, приведшей к интенсивной складчатости, были затронуты лишь отдельные линейные зоны, такие как байкалиды в пределах Тимано-Печорского бассейна, каледониды Шпицбергена, герциниды Западной Сибири, киммериды Новой Земли, Земли Франца Иосифа, Северной Земли и Таймыра.

Восточный Аме́разийский блок, который представляет собой северо-восточное продолжение Сибирской платформы, превратился в платформенно-складчатую область, где большая часть затронута позднекиммерийской складчатостью умеренного сжатия с рядом крупных остаточных срединных массивов. Отдельные реликты рифтогенных прогибов палеозойского возраста можно проследить в пределах Чукотского моря, моря Лаптевых, где верхнепалеозой-нижнемезозойские терригенно-карбонатные толщи формируют линейные валообразные поднятия. Часто инверсия приводила к образованию складчатости с широким развитием чешуйчатых надвигов Врангелевско-Геральдской гряды и Верхоянского складчатого пояса. Новая эпоха позднемелового и палеоцен-эоценового растяжения привела к сбросовым смещениям и формированию крупных Северо-Чукотского и Восточно-Сибирского прогибов.

В силу деструкции нижнего палеозой-мезозойского комплекса осадочного чехла, районирование восточного сектора российской Арктики ведется по структуре верхнемелового – кайнозойского плитного чехла. В его пределах выделяются Северо-Чукотский и Южно-Чукотский прогибы, разделенные Врангелевско-Геральдской складчато-надвиговой зоной. В юго-восточной части Восточно-Сибирского моря расположен крупный одноименный прогиб.

Существенная роль в новейшем тектоническом плане принадлежит арктической рифтовой системе, которая, возможно, привела к образованию океанической коры в районе подводных хребтов Гаккеля и Книповича. Кайнозойская рифтовая система, вероятно, уже без разрыва сплошности коры имеет продолжение в пределах моря Лаптевых в виде системы горстов и грабенов, заполненных кайнозойскими осадками. Ее южные ветви прослеживаются на юг и юго-восток в пределах суши, являясь естественным продолжением более древних киммерийских структур Верхоянского складчатого пояса.

Международный спор разгорелся вокруг подводного хребтов Менделеева и Ломоносова, которые тянутся к Гренландии. Необходимо было прояснить их геологическое положение и разобраться, являются ли они продолжением российского континентального шельфа. Для этого Россия проводила исследования в августе 2005 г. на судне «Академик Федоров» в районе поднятия Менделеева и в период с 13 мая по 24 июня 2007 г. на атомном ледоколе «Россия» в районе хребта Ломоносова.

В 2007 г. были проведены геолого-геофизические исследования в зоне сочленения хребта Ломоносова с шельфом морей Лаптевых и Восточно-Сибирского по обоснованию внешней границы континентального шельфа РФ. Проводились глубинные сейсмические исследования, аэрогеофизическая

съемка, сейсмоакустические исследования. Были получены данные анализа модели земной коры, которые подтвердили, что структура коры хребта Ломоносова соответствует мировым аналогам континентальной коры, а значит, является частью прилегающего континентального шельфа Российской Федерации.

2 августа 2007 г. была проведена российская экспедиция к северному полюсу «Арктика – 2007». В состав экспедиции вошли д.т.н. Анатолий Сагалевич, чл.-кор. РАН Артур Чилингаров и другие исследователи. На двух

глубоководных обитаемых аппаратах "Мир" было проведено погружение на дно Северо-Ледовитого океана в точку Северного полюса, где был установлен Российский флаг. В декабре 2007 г. комплект материалов, обосновывающий положение внешней границы континентального шельфа РФ был составлен и передан, в Министерство природных ресурсов РФ. В материалах доказана принадлежность хребта Ломоносова к континентальному российскому шельфу. В соответствии с этими материалами РФ должна получить право на 1,2 миллиона кв. км площади в Арктике и на разработку огромных месторождений нефти и газа на треугольнике Чукотка-Мурманск-Северный полюс.

Таким образом, геологическое строение арктической зоны России характеризуется разнообразными тектоническими структурами, образованными в разные геологические циклы тектогенеза. Однако материковый шельф, склон и океаническое ложе, как в Западном Евразийском блоке, так и в Восточном Американо-Сибирском блоке являются продолжением Восточно-Европейской и Сибирской древних платформ и молодых Западно-Сибирской плиты и Северо-Восточной горно-складчатой системы. Структуры Арктической зоны находятся на общем субстрате с указанными материковыми мегаструктурами. По этой причине сектор Арктической зоны России должен оставаться по всей северной окраине Российского побережья и включать территории описанных выше тектонических структур.

1.3 Климат

Арктическая зона охватывает моря и острова Северного Полярно бассейна, а на континенте – полосу, прилегающую к берегам морей этого бассейна, за исключением Мурманского побережья. Южная граница арктической зоны совпадает с южной границей тундры и приблизительно с изотермой 10°C самого теплого месяца в году.

Арктическая зона является областью преобладания в течение всего года арктического воздуха. Этот воздух характеризуется низкими температурами и малым влагосодержанием. В зоне имеют место большие годовые колебания температуры воздуха и малые суточные изменения ее. Годовые суммы осадков не велики.

В летнее время во всей зоне на арктическом фронте развивается циклоническая деятельность. В зимнее время она протекает только в западной и восточной окраинах Российской Арктики.

Климатические условия Российской Арктики изменяются с запада на восток. Самой теплой частью ее является район Баренцева моря. В этом районе очень часто проходят циклоны, с которыми связан перенос теплого атлантического воздуха на восток и северо-восток к Карскому морю. В некоторых случаях этот воздух может достигать даже полюса. Наиболее частое прохождение циклонов бывает здесь зимой.

В марте – апреле циклоническая деятельность в Арктике ослабевает, область же высокого давления усиливается. В связи с этим в западном районе Арктики устанавливается холодная, солнечная погода. Наиболее холодным месяцем в году в этом районе является март. Летом в западном районе Российской Арктики вновь начинает развиваться циклоническая деятельность.

В западный район Российской Арктики входят: Земля Франца-Иосифа, Новая Земля и узкая прибрежная полоса тундры от полуострова Канин до полуострова Таймыр.

На Земле Франца-Иосифа, которая представляет собой архипелаг, в бухте Тихой самым холодным месяцем является март, средняя температура которого – 22.5°С. Следует, однако, указать, что средние месячные температуры за период декабрь – март мало различаются между собой.

В зимние месяцы на Земле Франца-Иосифа часто бывают оттепели, во время которых иногда выпадает дождь. Такие потепления среди зимы

вызываются вторжением морского воздуха со стороны Атлантического океана. Зимой часто дуют сильные ветры, придающие климату значительную суровость.

Самым теплым месяцем в году на Земле Франца-Иосифа является июль. Средняя температура его 1.3°C . В отдельные дни температура летом может достигать до 10°C . Облачность велика, особенно в конце лета и осенью. Летом часто бывают туманы. Годовое количество осадков $200 - 300$ мм.

С климатом Земли Франца-Иосифа сходен климат северной части Новой Земли. Здесь также самым холодным месяцем в году является март. Средняя температура его равна -21.5°C . Однако средние месячные температуры зимних месяцев мало отличаются друг от друга. Самый теплый месяц август, средняя температура его 2°C . В южной части Новой Земли климат теплее. В проливе Маточкин Шар средняя температура января -20.5°C , февраля и марта -19°C , июля и августа -5.5°C . На берегах Новой Земли часто наблюдается сильная бора.

На континенте климатические условия западной части Российской Арктики значительно улучшаются. В низовьях Печоры (Нарьян-Мар) средняя температура января повышается до -18°C , июля до -12°C , годовая сумма осадков достигает 360 мм.

По мере продвижения на восток климатические условия арктической зоны постепенно изменяются. Циклоническая деятельность ослабевает, особенно зимой, увеличивается частота и длительность вторжения арктического воздуха, возрастает мощность вечной мерзлоты. Последняя встречается в восточной части Кольского полуострова, а затем вновь появляется на полуострове Канин. Мощность ее в районе Воркуты достигает 130 м, в районе Нордвика – 600 м.

Суровые климатические условия создаются в азиатской части Арктики – в полосе тундры от устья Енисея до Колымы, а также на островах

Новосибирских, Врангеля и Северной Земле. В зимнее время здесь устанавливается высокое давление, в связи с чем зимы в азиатской части Арктики отличаются весьма холодной, ясной и тихой погодой. Средняя температура января в низовьях Лены достигает -38°C -40°C , в отдельные дни бывают морозы до -55°C и более. Осадков зимой выпадает очень мало, толщина снежного покрова незначительна – около 30 см. Лето короткое и прохладное. Однако в низовьях Лены температура воздуха иногда поднимается до 25°C и выше. Летом часто бывают туманы.

В летние месяцы в азиатской части Арктики развивается циклоническая деятельность на арктическом фронте, в связи с чем наблюдается частое выпадение осадков в виде дождя или снега. Годовая сумма осадков составляет около 200 мм, а в дельте Лены она снижается до 100 мм.

Климат Северной Земли, Новосибирских островов и острова Врангеля суровый. Северная Земля представляет собой архипелаг. Значительная площадь островов этого архипелага покрыта ледником. Здесь, так же как и в западной Арктике, самым холодным месяцем является март; средняя температура его около -28°C . Самый теплый месяц – июль; средняя температура его около $1-2^{\circ}\text{C}$. Наименьшая облачность приходится на декабрь и март, наибольшая – на сентябрь. Преобладающими в среднем за год являются ветры юго-восточного направления.

На Новосибирских островах и острове Врангеля зима весьма холодная, с малооблачной погодой. Средняя температура самых холодных месяцев (января и февраля) около -30°C . Лето пасмурное, сырое, с частыми туманами; временами выпадает снег. Средняя температура самых теплых месяцев (июля и августа) около $1-3^{\circ}\text{C}$. Иногда на острова с юга проникает летом теплый континентальный воздух, в этих случаях температура может повышаться до 10°C и более.

За р. Колымой в арктической зоне начинает сказываться влияние Берингова и Чукотского морей. В летнее время с этих морей на континент часто приходят массы воздуха, вызывающие облачную холодную погоду. Однако в отдельные летние дни в восточную часть Российской Арктики может вторгаться теплый континентальный воздух из Сибири. При таких вторжениях максимальные температуры поднимаются до 20°C и даже выше. В зимнее время со стороны Алеутских островов в этот район Арктики приходят влажные массы морского воздуха, вызывающие пасмурную погоду, благодаря которой в сильной степени уменьшается потеря тепла земной поверхностью через излучение. Зимы в восточном секторе Российской Арктики суровы, но они все же теплее, чем к западу от Колымы.

Острова Арктики в значительной части покрыты льдом. Лучшие условия для развития растений в арктической зоне создаются только в тундре, расположенной в основном на континенте, вдоль берегов полярных морей. Вегетационный период в тундре короткий – около 2 – 3 месяцев. Начинается он поздно, так как до его наступления много тепла уходит на таяние снега, на оттаивание верхнего слоя почвы и на испарение излишков воды. В течение вегетационного периода растения получают мало тепла вследствие низкого положения солнца над горизонтом. Этот недостаток тепла усугубляется в тундре еще вечной мерзлотой, которая охлаждает верхний слой почвы, оттаивающий летом на небольшую глубину. Кроме того, он в теплое время года содержит много воды, так как лежащий ниже мерзлый грунт препятствует просачиванию ее в глубокие слои. При таких условиях питательные вещества, в первую очередь азот, поступают в растения с большим трудом, рост задерживается.

Большой вред растениям в тундре причиняют сильные ветры. Они иссушают их, понижают температуру листьев, вызывают механические повреждения. Особенно опасны эти ветры в самом начале вегетационного периода, когда пробуждающиеся надземные части растений начинают испарять

влагу, а корни их находятся еще в мерзлой почве. Поэтому растения в тундре находят более благоприятные условия для своего роста и развития в защищенных от ветра местах – в долинах рек или на склонах.

Прямая солнечная радиация в тундре отступает на второй план благодаря большой облачности. Преобладающее значение в тундре получает рассеянная радиация. Следует также отметить, что в тундре ввиду большой прозрачности воздуха имеет место значительная ультрафиолетовая радиация; интенсивность ее в тундре даже выше, чем в средних широтах. Благодаря большой продолжительности дня растения тундры за вегетационный период получают достаточное количество света. Кроме того, коэффициент использования солнечной энергии при рассеянном свете гораздо больше, чем при прямом солнечном освещении. Все это дает возможность растениям тундры создавать значительную органическую массу в условиях длинного дня короткого и прохладного полярного лета.

В настоящее время на Крайнем Севере посевы занимают большую площадь. Так, заново создано земледелие в ряде северных районов Якутии, Таймырском и Ямало-Ненецком национальных округах и др. В этих районах выращиваются картофель, капуста белокочанная и цветная, брюква, репа, морковь и другие овощные культуры. Скороспелые овощи успешно выращиваются даже на побережье Северного Ледовитого океана (например, в бухте Тикси).

Для леса в тундре создаются неблагоприятные условия вследствие недостатка тепла, избытка влаги, сильных ветров и высокой относительной влажности воздуха летом. Поэтому тундра безлесна. Растительность в тундре главным образом травянистая. Большое распространение в тундре имеют болота [6].

1.4 Почвы

Арктические почвы распространены пятнами на свободных ото льда участках суши под разобщёнными куртинами травяно-лишайниково-моховой растительности. Почвообразующими породами служат морские суглинки и глины, а также щебнисто-мелкозёмистые продукты выветривания и переотложения коренных пород. Арктические почвы оттаивают на глубину 20–30 см. Маломощный (1–2 см) гумусовый горизонт ниже сменяется неоглеенной и недифференцированной толщей. Содержание гумуса не превышает 1,0–1,5 %, реакция среды близкая к нейтральной. Для почв, формирующихся на побережьях океана, характерно накопление солей, местами солевые выцветы на поверхности. Значительная часть территории арктической зоны занята выходами коренных пород и каменистыми россыпями, практически лишенными растительности и почв.

Почво-грунты в Арктической зоне характеризуются следующими особенностями:

- Низкая температура: почва в Арктике обычно имеет низкую температуру, что затрудняет рост растений и микроорганизмов.
- Высокая влажность: из-за низкой температуры и короткого вегетационного периода, почва в Арктике часто бывает влажной. Это может привести к заболачиванию и образованию торфяников.
- Слабая аэрация: низкая температура и высокая влажность могут привести к недостаточной аэрации почвы, что негативно сказывается на росте растений.
- Бедный минеральный состав: почвы в Арктике содержат мало питательных веществ, таких как азот, фосфор и калий. Это затрудняет выращивание сельскохозяйственных культур.

В Арктической зоне можно выделить несколько типов почвы.

Тундровые почвы. Эти почвы характеризуются низким содержанием гумуса и высокой кислотностью. Они распространены в тундровых зонах и имеют ограниченную способность к удержанию влаги.

Торфяные почвы. Торфяники образуются в условиях избыточного увлажнения и недостатка кислорода. Они богаты органическими веществами и могут быть использованы для выращивания некоторых видов растений.

Из-за сложных почвогрунтовых условий, растительный покров в Арктической зоне ограничен. Здесь преобладают мхи, лишайники и низкорослые кустарники. Однако некоторые виды растений, такие как ивы и березы, могут адаптироваться к условиям Арктики и образовывать небольшие рощи.

Несмотря на сложные условия, в некоторых районах Арктической зоны возможно выращивание некоторых сельскохозяйственных культур, таких как овес, ячмень и картофель. Для этого необходимо проводить специальные мероприятия по улучшению почвенных условий, такие как внесение удобрений и мелиорация.

Однако следует отметить, что сельское хозяйство в Арктической зоне ограничено из-за таких проблем как суровые климатические условия, бедный минеральный состав почвы и сложность транспортирования.

Однако, несмотря на эти проблемы, существуют перспективы развития сельского хозяйства в Арктической зоне. Это может быть достигнуто путем разработки новых технологий и методов, которые позволят адаптировать сельское хозяйство к суровым условиям Арктики. Например, можно использовать более устойчивые к холоду сорта растений, а также применять методы мелиорации и улучшения почвенных условий.

Кроме того, развитие сельского хозяйства в Арктике может иметь ряд преимуществ, таких как обеспечение продовольственной безопасности региона и создание новых рабочих мест. Однако для успешного развития сельского хозяйства необходимо провести дополнительные исследования и разработать эффективные стратегии адаптации к условиям Арктики.

В целом, использование почв в сельском хозяйстве в Арктической зоне является сложной задачей, требующей учета множества факторов. Однако при правильном подходе и использовании современных технологий, сельское хозяйство в Арктике имеет потенциал для развития и может стать важным источником продовольствия и занятости для населения региона [14].

1.5 Растительность

Растительный покров в Арктической зоне представлен преимущественно мхами, лишайниками и низкорослыми кустарниками. Это связано с суровыми климатическими условиями, такими как низкие температуры, короткий вегетационный период и высокая влажность. Однако некоторые виды растений, такие как ивы и берёзы, могут адаптироваться к условиям Арктики и образовывать небольшие рощи.

В Арктической зоне можно выделить три следующие типы растительности.

Тундровая растительность. Этот тип растительности характерен для тундровых зон и представлен мхами, лишайниками, осоками и некоторыми видами кустарников. Тундровая растительность имеет ограниченную способность к удержанию влаги и может быть подвержена эрозии.

Лесотундровая растительность. Лесотундра представляет собой переходную зону между тундрой и тайгой. Здесь встречаются как тундровые,

так и таёжные виды растительности, такие как карликовые берёзы и ели. Лесотундровая растительность более устойчива к неблагоприятным климатическим условиям.

Горная растительность. В горных районах Арктической зоны можно встретить различные виды альпийской растительности, такие как мхи, лишайники и низкорослые кустарники. Горная растительность адаптирована к суровым условиям высокогорья.

Растительность играет важную роль в экологической системе Арктической зоны. Она обеспечивает среду обитания для многих видов животных, таких как олени, лемминги и птицы. Кроме того, растительность участвует в круговороте веществ и энергии в экосистеме, обеспечивая питание и укрытие для других организмов.

2 МЕТОДЫ РАСЧЕТА СРЕДНЕМНОГОЛЕТНЕГО ИСПАРЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ СУШИ

2.1 Способы определения испарения

Для выполнения расчетов по данной работе требуется метод определения годового среднего многолетнего испарения в зависимости от изменяющихся климатических факторов. В нашей стране для этого существует три способа [8]: по карте изолиний испарения (рисунок 2.1), опубликованной в 1976 г. Расчет среднего многолетнего годового испарения с поверхности речных водосборов методом-водного баланса производился с конца прошлого века. По мере повышения гидрометеорологической изученности возрастала надежность карт норм годовых сумм осадков и стока, которые строились на основе все увеличивающегося числа пунктов наблюдений. Качественный скачок в повышении надежности этого метода произошел в конце 1960-х годов в связи с разработкой в СССР методики корректировки осадков, измеренных осадкомером Третьякова, и методики приведения к показаниям этого прибора данных предшествующих длительных измерений с помощью дождемера с защитой Нифера. Были построены карты норм годовых сумм исправленных осадков и суммарного испарения сначала для территории СССР, а затем и для всего земного шара; по методу А.Р. Константинова. В его основе лежит выявленная им зависимость вертикальных градиентов температуры и влажности воздуха от смещенных во времени значений этих элементов. Используя уравнения турбулентной диффузии и обширный экспериментальный материал, Константинов получил графические зависимости испарения от исправленных значений температуры и влажности воздуха, а также разработал расчетные таблицы поправок к последним. Эти

поправки вводятся для месячных, декадных и суточных значений температуры. При расчетах испарения за год такие поправки не вводятся. В качестве примера представлен график зависимости E от средних годовых значений температуры и влажности воздуха, используемой для расчета годовых сумм испарения E . Кроме графиков для расчета испарения, Константиновым составлены аналогичные графики для расчета испаряемости, под которой он понимает испарение с оптимально увлажненного луга. (рисунок 2.3); по уравнениям связи. Такими уравнениями в гидрометеорологической литературе в настоящее время называют уравнения, связывающие норму годового испарения с нормой годовых осадков и испаряемости [5]. Существует несколько уравнений связи, для выполнения работы необходимо подобрать подходящее.

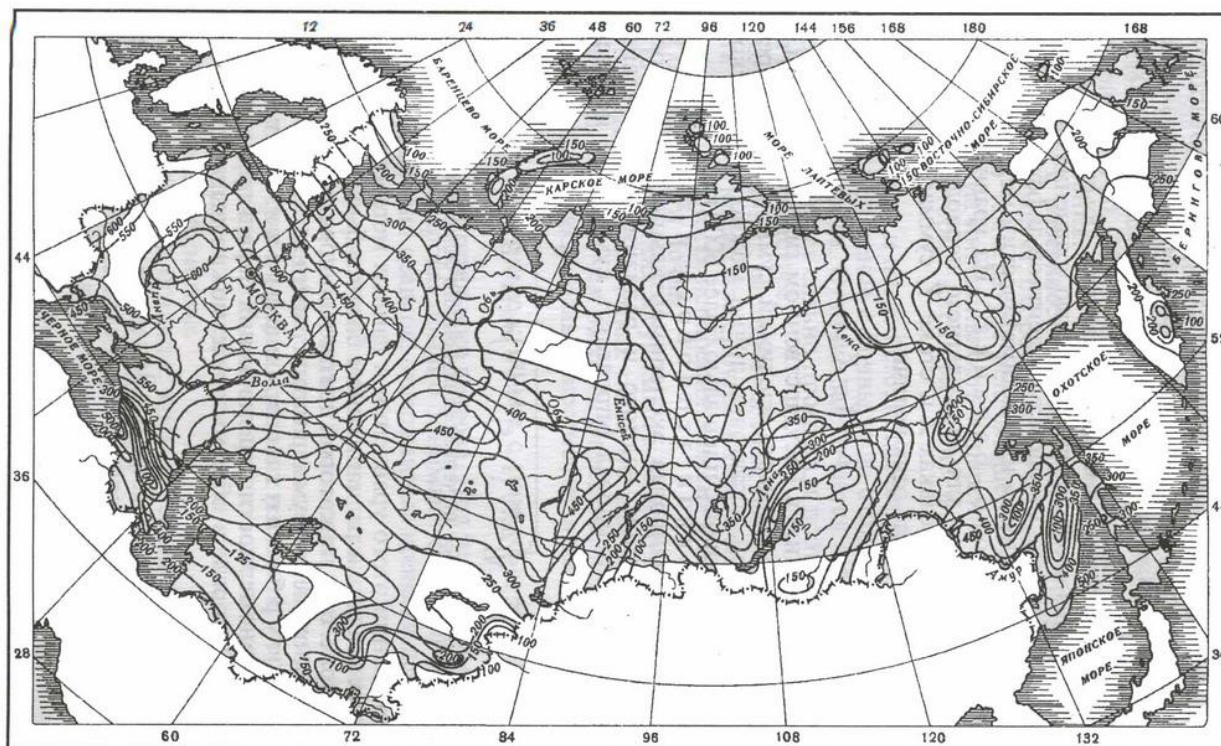


Рисунок 2.1 – Карта изолиний испарения с поверхности суши в миллиметрах.

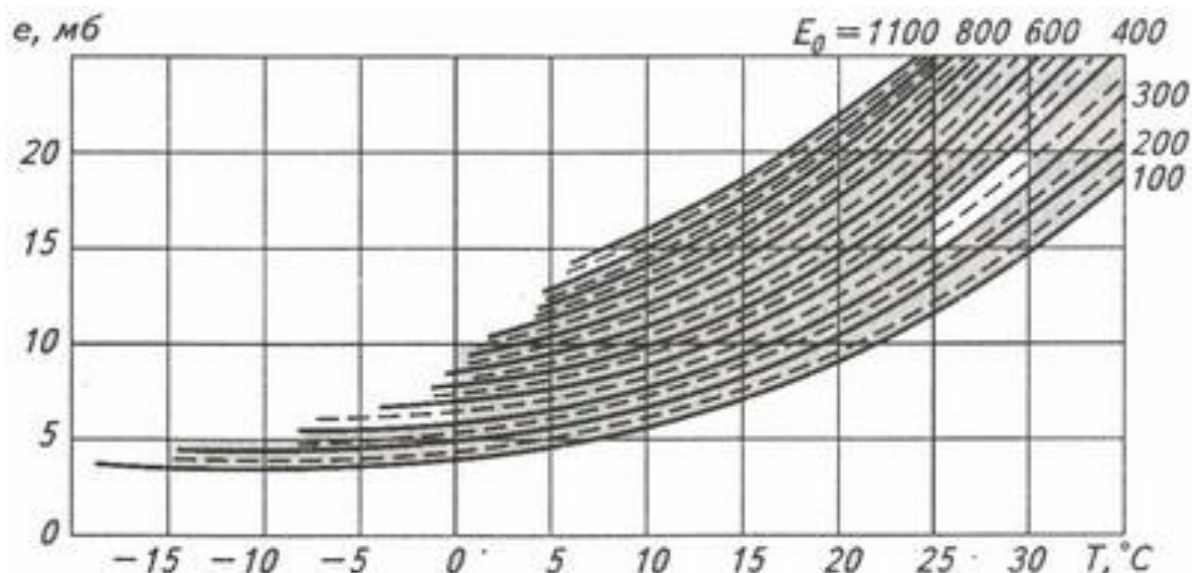


Рисунок 2.2 – Номограмма для расчета испарения по методу А.Р. Константинова.

2.2 Уравнения связи

Взаимосвязь уравнения теплового баланса и уравнения водного баланса стремятся описать давно. Первым уравнением связи считается уравнение немецкого гидролога Шрейбера (начало 20 века) [12]:

$$E = X[1 - e^{-E_0/X}]. \quad (2.1)$$

Также известны уравнения [12] Э.М. Ольдекопа [8]:

$$E = E_0 \tanh\left(\frac{X}{E_0}\right), \quad (2.2)$$

В.С. Мезенцева:

$$E = E_0 \left[1 - \left(\frac{kX}{E_0} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}}, \quad (2.3)$$

Л. Тюрка:

$$E = X \left[A + \left(\frac{X}{E_0} \right)^2 \right]^{-0.5}. \quad (2.4)$$

М.И. Будыко при использовании уравнений (1) и (2) пришел к выводу [1], что уравнение (2.1) несколько преуменьшает, а уравнение (2.2) несколько преувеличивает значения испарения, поэтому предложил определять испарение как среднее геометрическое из того, что дают при расчете эти уравнения:

$$E = \sqrt{E_{(1)}E_{(2)}}. \quad (2.5)$$

Где E , E_0 и X – годовые нормы испарения, испаряемости и осадков соответственно;

$E_{(1)}$ и $E_{(2)}$ – испарение, рассчитанное по формулам (1) и (2) соответственно;

k , n и A – параметры, определенные опытным путем.

Испаряемость – максимально возможное испарение при данных метеорологических условиях с достаточно увлажненной подстилающей поверхностью, то есть в условиях неограниченного запаса влаги.

Обоснование общих свойств указанных зависимостей впервые было дано Э.М. Ольдекопом [8]. Уравнения (2.1), (2.2) и (2.5) содержат только один параметр – испаряемость E_0 , которая обуславливается только

метеорологическими факторами, на что указывает вышеприведенное определение. Так как для среднесноголетних условий формула водного баланса проста: осадки расходуются на сток и испарение, получается, что единственным фактором, разделяющим осадки между процессами стока и испарения, является некоторая совокупность метеорологических, то есть внешних по отношению к водосбору условий. Свойства самого водосбора (тип почвогрунтов, рельеф и др.) в уравнениях (2.1), (2.2) и (2.5) не учитываются, что является их принципиальным недостатком.

Уравнения (2.3) и (2.4), содержащие несколько параметров, способны достаточно гибко аппроксимировать зависимость $E=f(X)$ (рисунок 2.3). Однако физический смысл параметров n и A определен нечетко, что является определенным недостатком этих уравнений.

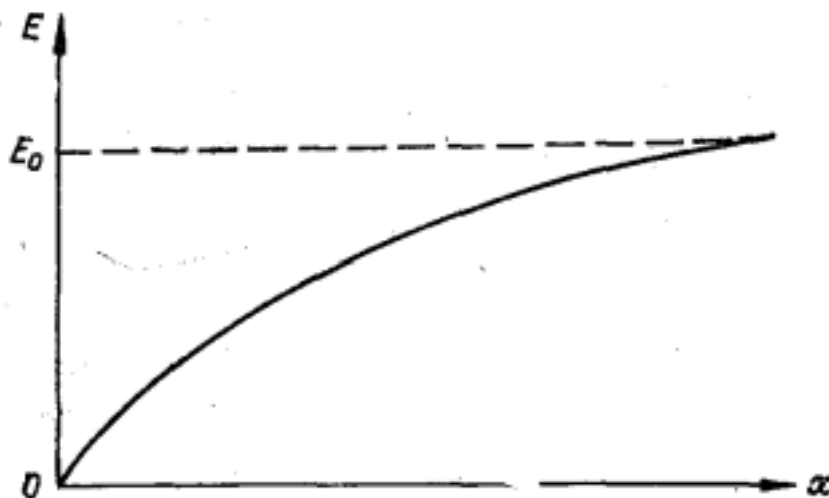


Рисунок 2.3 – Зависимость годовых норм испарения
от осадков

Н.А. Багров [7] считал, что первая производная стока u по осадкам определяется соотношением испарения и испаряемости, и что в самом общем виде эту зависимость можно записать следующим образом:

$$\frac{dy}{dX} = \left(\frac{E}{E_0}\right)^m. \quad (2.6)$$

Так как для среднемноголетних условий уравнение водного баланса замкнутого речного водосбора имеет вид:

$$y = X - E, \quad (2.7)$$

то

$$\frac{dy}{dX} = 1 - \frac{dE}{dX}, \quad (2.8)$$

откуда

$$\frac{dE}{dX} = \frac{1}{1 - (E/E_0)^m}, \quad (2.9)$$

Таким образом первая производная испарения по осадкам пропорциональна разности $1 - (E/E_0)^m$, которой трудно придать какой-либо физический смысл.

Только при $m = 1$ рассматриваемую разность можно трактовать как дефицит испарения, имеющий ясный физический смысл. В этом случае получается уравнение, похожее на уравнение (2.1):

$$E = E_0 [1 - e^{-x/E_0}]. \quad (2.10)$$

Однако при $m = 1$ производная dy/dx в выражении (2.6) в точности равна отношению испарения к испаряемости. Такая конкретизация смысла и величины dy/dx при составлении дифференциального уравнения представляется чрезмерной. При $m = 2$ после интегрирования и определения постоянной интегрирования получаем уравнение, похожее на уравнение (2.2):

$$E = x \tanh \left(\frac{E_0}{x} \right). \quad (2.11)$$

Недостатки рассматриваемых уравнений пробуждают к поискам другой формы уравнения связи. По всем приведенным выше формулам испарение зависит от осадков и испаряемости, т.е. от внешних, относительно данного водосбора, факторов. А.Н. Постников попытался найти другую форму уравнения связи, в котором бы присутствовали сведения, характеризующие данный водосбор. Далее приводим выдержки из этой работы, поясняющие ход рассуждений ее автора.

Предположим, что норма осадков для данного водосбора изменяется от очень малых до очень больших значений. В соответствии с этим положением будут также меняться нормы речного стока и испарения.

Итак, при очень малых осадках вся вода будет аккумулироваться поверхность и расходоваться на испарение, а стока не будет. Так будет продолжаться до тех пор, пока значения осадков не достигнут величины x_1 , при превышении которой начнет появляться сток. При дальнейшем увеличении осадков будут расти как сток, так и испарение. Однако рост последнего будет происходить не бесконечно: при достижении осадков некоторого значения x_0

испарение сравнивается с испаряемостью и при дальнейшем увеличении x уже расти не будет, то есть при $x \geq x_0$ будет иметь место равенство $E = E_0$. Также очевидно, что в точке x_1 производная $dy/dx = 0$, затем она начинает расти и в точке x_0 достигает своего максимума и постоянного значения: $dy/dx = 1$. Понятно, что любому значению dy/dx соответствует некоторое значение E . Опираясь на это, будем считать, что справедливо равенство

$$1 - \frac{dy}{dx} = a(E_0 - E)^n, \quad (2.12)$$

где a и n – параметры.

С учетом выражения (2.8) уравнение (2.12) примет вид

$$\frac{dE}{dx} = a(E_0 - E)^n, \quad (2.13)$$

интегрирование уравнения (2.13) дает

$$\frac{(E_0 - E)^{1-n}}{1-n} = ax + C, \quad (2.14)$$

где C – постоянная интегрирования.

Используя условия $E = x_1$ при $x = x_1$, $E = E_0$ при $x = x_0$, из уравнения (2.14) получаем

$$E = E_0 - (E_0 - x_1) \left(\frac{x_0 - x}{x_0 - x_1} \right)^{\frac{1}{1-n}} = v. \quad (2.15)$$

Выше отмечалось, что $dy/dx = 0$ при $x = x_1$, это условие позволяет из равенства (2.12) установить, что

$$n = \frac{x_0 - E_0}{x_0 - x_1}. \quad (2.16)$$

$(x_0 - x_1)$ – это стокообразующие осадки, то есть часть осадков, которая дает сток. Поэтому n представляет собой коэффициент стока стокообразующих осадков, когда $x = x_0$. Таков физический смысл параметра n . Отсюда $0 \leq n \leq 1$.

Таким образом, зависимость испарения от осадков представляется системой уравнений:

$$\begin{aligned} E &= x \text{ при } x \leq x_1, \\ E &= v \text{ при } x_1 < x < x_0, \\ E &= E_0 \text{ при } x \geq x_0, \end{aligned} \quad (2.17)$$

Попытаемся указать, от каких факторов могут зависеть параметры x_1 и x_0 . x_0 , во-первых, при одном и том же значении E_0 , но при разных уклонах склонов, x_0 должен быть больше на водосборе с большими уклонами, чем на водосборе с малыми уклонами. Во-вторых, если рассматривать, например пару бассейнов – один с суглинистыми, другой с песчаными почвами, то легко заметить, что песок, обладая высокой фильтрационной способностью, будет быстро пропускать через себя воду вниз, то есть изымать ее у поверхностного стока и мало воды оставлять для испарения. В бассейне с суглинистыми почвами, наоборот, условия будут более благоприятными для испарения. Физические

свойства почвы вполне могут характеризоваться объемным весом. И последний фактор – это распределение осадков во времени. Весьма существенно, когда и как часто они выпадают. Например, там, где большая часть годовых осадков выпадает в холодный период года, условия для стока более благоприятны, чем там, где большая часть осадков выпадает в теплый период (в первом случае значение x_0 будет больше, чем во втором). Рассмотрим также два случая выпадения одного и того же количества осадков: в первом случае осадки выпадают в виде двух дождей, а во втором – в виде десяти дождей через равные интервалы времени. В последнем случае благоприятнее условия для испарения, а в первом – для стока, поэтому в последнем случае x_0 меньше, чем в первом [4].

x_0 должен зависеть, во-первых, от распределения осадков во времени: чем за большее число раз будет выпадать одно и то же количество осадков, тем больше будет x_1 . Во-вторых, x_1 зависит каким-то образом от условий стекания. Например, чем больше уклоны склонов или чем больше густота речной сети на водосборе, тем меньше остается шансов у воды задержаться на поверхности бассейна, тем меньше x_1 . В-третьих, значение x_1 должно до некоторой степени определять общим уровнем увлажнения: у влажных почв x_1 будет меньше, чем у пересушенных. По этой причине, по-видимому, x_1 может возрастать при переходе от лесной к лесостепной и далее степной зонам. Зависимость x_1 и x_0 от многих переменных осложняет применение уравнения (2.16).

Интересно отметить, что из формулы (2.13) при $n = 1$ получаем

$$E = E_0 - (E_0 - x_1)e^{-\frac{x-x_1}{E_0-x_1}}, \quad (2.18)$$

где E_0 и x_1 имеют тот же смысл, что и в уравнении (2.17), но уже другие численные значения.

Если x_l принять равным нулю (вследствие отсутствия данных), то из уравнения (2.18) получаем уравнение (2.10). График функции

$$z = E_{(10)}/E_{(1)} \quad (2.19)$$

в зависимости от переменной x/E_0 представлен рисунок 2.3, из которого видно, что максимальное отклонение z от единицы составляет 12 %, то есть использование уравнений (2.1) и (2.10) приводит к близким результатам. Заметим, что по уравнениям (2.1) – (2.5) и (2.10) сток начинается сразу же, как только появляются сколь угодно малые осадки, что не соответствует действительности.

Использование различных уравнений связи показывает, что при превышении осадков испаряемости в два раза, испарение становится близко к испаряемости. Если в систему (2.17) вложить $x_l = 0$ и $x_0 = 2E_0$, то получим простое уравнение

$$E = x \left(1 - \frac{x}{4E_0} \right). \quad (2.20)$$

Испаряемость определяется как максимально возможное испарение для данных климатических условий при предположении, что испаряющая поверхность имеет избыточное увлажнение. Отсюда, испаряемость не зависит от увлажнения территории и определяется только ее тепловыми ресурсами. Таким образом, уравнения (2.1) – (2.5) имеют вид

$$E = f(x, E_0). \quad (2.21)$$

и связывают тепловые и водные характеристики данной территории. Если известен способ вычисления значений E_0 , то уравнения связи позволяют оценить не только испарение с той или иной территории, но и сток с нее, так как для среднесноголетних условий уравнение водного баланса имеет вид (2.7). Кроме того, задаваясь значениями осадков и переменных определяющих E_0 , можно получить значения стока и испарения в новых гидрометеорологических условиях.

За рубежом для расчета испарения широко используется уравнение (2.4) при

$$E_0 = 300 + 25t + 0,05t^3, \quad (2.22)$$

где t – норма среднегодовой температуры воздуха. Параметр A характеризует аридность территории и изменяет от 0,77 до 1,22, в среднем принимается равным 0,9. По данному уравнению $t < -10^\circ\text{C}$ испаряемость принимает отрицательные значения, то есть уравнение Л. Тюрка не подходит для территорий с такими значениями t , например для некоторой части Крайнего Севера.

А.Н. Постниковым было предложено еще одного уравнение связи [9]:

$$E = E_0(1 - e^{-z}), \quad (2.23)$$

где

$$z = \frac{x}{E_0} + 0,5 \left(\frac{x}{E_0} \right)^2, \quad (2.24)$$

и было предложено уравнение для расчета испаряемости:

$$E_0 = 16,8(0,8 + 0,011t_{\text{п}})(90 - 52e^{0,11(6-t_{\text{п}})}), \quad (2.25)$$

где $t_{\text{п}}$ – норма среднегодовой температуры воздуха за теплый период. Очевидно, что основная доля испарения с поверхности суши на территории Российской Федерации приходится на теплый период года. Поэтому, если испаряемость зависит от температуры воздуха, то более тесная зависимость у нее должна быть с температурой именно за теплый период, а не с температурой за год. В качестве характеристики температуры воздуха за теплый период можно использовать сумму среднемноголетних значений температуры воздуха за месяцы теплого периода года, деленая на 12. К месяцам теплого периода года относятся месяцы с неотрицательными нормами температуры воздуха. Деление на 12, а не на число месяцев с положительной температурой делает характеристику $t_{\text{п}}$ в разных пунктах более сравнимой и в случае, когда температура во все месяцы года положительна, то $t_{\text{п}}$ превращается в среднюю годовую температуру воздуха.

Если каждое из приведенных уравнений связи разделить на x , то левые части уравнений превратятся в E/x – коэффициенты испарения, а правые – будут зависеть только от аргумента E_0/x . Задавая значения E_0/x в диапазоне возможных изменений величины, по всем уравнениям можно вычислить значения коэффициентов испарения, сравнить их и получить представление о расхождении оценок испарения по различным уравнениям связи (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Коэффициенты испарения, определенные по различным уравнения связи

E_0/x	(2.1)	(2.2)	(2.5)	(2.10)	(2.11)	(2.20)	(2.23)
0,4	0,33	0,39	0,36	0,37	0,38	0,38	0,40
0,5	0,39	0,48	0,44	0,43	0,46	0,50	0,49
0,6	0,45	0,56	0,50	0,49	0,54	0,58	0,57
0,7	0,50	0,62	0,56	0,53	0,60	0,64	0,64
0,8	0,55	0,68	0,61	0,57	0,66	0,69	0,70
1	0,63	0,76	0,69	0,63	0,76	0,75	0,78
1,2	0,70	0,82	0,76	0,68	0,83	0,79	0,83
1,4	0,75	0,86	0,80	0,71	0,89	0,82	0,87
1,6	0,80	0,89	0,84	0,74	0,92	0,84	0,90
1,8	0,83	0,91	0,87	0,77	0,95	0,86	0,91
2	0,86	0,93	0,89	0,79	0,96	0,88	0,93
2,2	0,89	0,94	0,91	0,80	0,98	0,89	0,94
2,5	0,92	0,95	0,93	0,82	0,99	0,90	0,95
2,8	0,94	0,96	0,95	0,84	0,99	0,91	0,96
3,0	0,95	0,96	0,96	0,85	1,00	0,92	0,97
E_0/x	(2.1)	(2.2)	(2.5)	(2.10)	(2.11)	(2.20)	(2.23)
3,2	0,96	0,97	0,96	0,86	1,00	0,92	0,97
3,5	0,97	0,97	0,97	0,87	1,00	0,93	0,98
4,0	0,98	0,98	0,98	0,88	1,00	0,94	0,98

Примечание. В верхней строке таблицы указаны номера уравнений по тексту данной работы.

Данные таблицы 2.1 говорят о том, что в некоторых диапазонах E_0/x оценки коэффициента испарения близки по всем уравнениям, а в некоторых диапазонах заметно расходятся. Наибольшая согласованность в оценках величин E_0/x наблюдается между уравнениями (2.2), (2.5) и (2.23), то есть уравнениями Ольдекопа, Багрова и Постникова.

По уравнениям (2.2), (2.5), (2.20) и (2.23) производились расчеты испарения [10] для отдельных регионов Советского Союза, и результаты расчета сравнивались с данными карты среднего годового испарения,

построенной в Государственном гидрологическом институте на основе уравнения водного баланса речного бассейна [13]. Погрешности определения испарения по этим уравнениям оказались близкими и среднем составили 6 – 8 % относительно данных карты.

Подводя итоги, можно констатировать следующее. Методика расчета норм годового испарения, основанная на применении формул (2.23) и (2.25), дает удовлетворительные результаты для территории РФ, на которых преобладают формы равнинного рельефа [2]. Погрешность расчета испарения по этой методике не превышает погрешностей расчета по другим уравнениям связи. Поэтому для оценок испарения в данной работе будет применяться уравнение связи (2.23), тем более что оно было получено на кафедре инженерной гидрологии нашего университета.

3 РАСЧЕТ И АНАЛИЗ НОРМЫ СРЕДНЕГОДОВОГО ИСПАРЕНИЯ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИИ

3.1 Исходные данные

Предпринята попытка оценить изменение испарения с поверхности суши и речного стока с территории материковой части Арктической зоны России под влиянием изменений климата. Определяющими факторами указанных процессов служили температура воздуха за теплый период года и годовые атмосферные осадки. Сравнение гидрометеорологических величин проводилось за периоды 1931-1960гг. и 1986-2015гг.

Исходные данные для расчета норм, т.е. данные по среднемесячным температурам воздуха и месячным суммам осадков, получены для обоих периодов с помощью базы данных электронного ресурса Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации *meteo.ru* [3]. При этом использовались осадки с двумя поправками: на смачивание и ветровой недоучет. В общей сложности расчеты проводились по 25 метеостанциям Арктической зоны России.

Таблица 3.1 – Метеостанции, по данным наблюдений которых проводились расчеты

Станция	Индекс станции	Широта	Долгота	Высота над уровнем моря
Ковдор	22240	68	30	209
Вайда-Губа	22003	70	32	15
Каневка	22249	67	40	151

Станция	Индекс станции	Широта	Долгота	Высота над уровнем моря
Кемь-Порт	22520	65	35	10
Гридино	22422	66	35	12
Сура	22676	64	46	78
Койнас	22583	65	48	63
Хоседа-Хард	23219	67	59	84
Петрунь	23324	66	61	60
Елецкая	23220	67	64	113
Салехард	23330	66	67	15
Игарка	23274	67	86	20
Туруханск	23472	66	88	35
Тура	24507	64	100	209
Хатанга	20891	72	102	33
Саскылах	21802	72	114	24
Джалинда	21908	70	114	266
Жиганск	24343	67	123	60
Джарджан	24143	69	124	39
Кюсюр	21921	71	127	71
Верхоянск	24266	68	133	127
Усть-Чаркы	24371	67	137	314
Усть-Мома	24382	66	143	195
Оймякон	24688	63	143	741
Сусуман	24790	63	148	650

3.2 Нормы годовых осадков и температуры воздуха за теплый период

Полученные нормы годовых осадков и температур воздуха за теплый период представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Полученные нормы P и $t_{п}$

м/с	1931-1960		1986-2015		Изменение	
	$t_{п}$, °C	X , мм	$t_{п}$, °C	X , мм	$\Delta t_{п}$, °C	ΔX , мм
Ковдор	3,4	598	3,8	647	0,4	49
Вайда-Губа	3	690	3,4	650	0,4	-40
Каневка	3,1	562	3,3	511	0,2	-51
Кемь-Порт	4,2	576	4,5	553	0,3	-23
Гридино	4,1	559	4,4	495	0,3	-64
Сура	4,6	683	4,9	612	0,3	-71
Койнас	4,2	688	4,5	637	0,3	-51
Хоседа-Хард	2,9	528	3	542	0,1	14
Петрунь	3,2	606	3,4	634	0,2	28
Елецкая	2,7	782	3	741	0,3	-41
Салехард	3,2	585	3,3	523	0,1	-62
Игарка	3,2	705	3,5	647	0,3	-58
Туруханск	3,6	666	3,9	709	0,3	43
Тура	4	396	4,2	418	0,2	22
Хатанга	2,3	355	2,4	366	0,1	11
Саскылах	2,3	308	2,1	264	-0,2	-44
Джалинда	2,9	344	2,9	310	0	-34
Жиганск	3,7	377	3,7	393	0	16
Джарджан	3,3	441	3,3	396	0	-45
Кюсюр	2,6	427	2,7	438	0,1	11
Верхоянск	3,6	184	3,8	203	0,2	19
Усть-Чаркы	3,7	269	3,7	241	0	-28
Усть-Мома	3,6	226	4	239	0,4	13
Оймякон	3,4	209	3,4	250	0	41
Сусуман	3	314	3,5	319	0,5	5

Анализ данных таблицы 3.2 показывает, что практически на всех избранных станциях во втором периоде температура воздуха теплого периода года увеличилась ($\Delta t_{п} \geq 0$) по сравнению с первым периодом. Значение $t_{п}$ в среднем по территории увеличилось на 0,2 °C. Это изменение можно истолковать, также, следующим образом. Продолжительность теплого периода

в АЗР составляет, примерно, 4 месяца. Это означает, что сумма среднемесячных температур воздуха за теплый период года, согласно определению $t_{п}$, выросла в среднем на 0.02°C , т.е. норма температуры за каждый месяц увеличилась на 0.07°C . Наибольшие изменения температуры прослеживаются в северо-восточной части АЗР, где значения $\Delta t_{п}$ составляют $0.5 - 0.7^{\circ}\text{C}$.

Изменение осадков от первого ко второму периоду по территории носит знакопеременный характер и варьирует в пределах – от 4 мм (ст. Сусуман 24790) до 71 мм (ст. о. Сосновец 22355), при этом какую-либо закономерность этих изменений по территории установить трудно. Изменения испарения на подавляющем большинстве станций имеют положительные значения, небольшие отрицательные изменения отмечены только на трех станциях в восточной зоне АЗР (табл. 2). В среднем по территории испарение во втором периоде увеличилось на 16 мм, т.е. на 7.2 % по сравнению с первым.

3.3 Нормы испарения

По формулам (2.23) – (2.25) рассчитываются нормы годового испарения, расчет представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты расчета норм годового испарения и стока

м/с	1931-1960			1986-2015			Изменение в мм ΔE
	E_0 , мм	Z	E , мм	E_0 , мм	Z	E , мм	
Ковдор	292	4,14	288	336	3,78	328	41
Вайда-Губа	247	6,68	247	292	4,69	290	43
Каневка	259	4,53	256	281	3,47	272	17
Кемь-Порт	378	2,68	352	409	2,26	367	14
Гридино	368	2,67	343	399	2,01	346	3
Сура	419	2,96	397	449	2,29	404	6
Койнас	378	3,47	367	409	2,77	384	17
Хоседа-Хард	236	4,75	234	247	4,59	245	11

м/с	1931-1960			1986-2015			Изменение в мм
	E_0 , мм	Z	E , мм		E_0 , мм	Z	E , мм
Петрунь	270	4,76	268	292	4,52	289	21
Елецкая	212	10,5	212	247	7,49	247	35
Салехард	270	4,51	267	281	3,59	273	6
Игарка	270	6,02	269	303	4,41	300	30
Туруханск	314	4,36	310	347	4,13	341	31
Тура	357	1,72	294	378	1,72	310	17
Хатанга	165	4,48	163	177	4,21	174	11
Саскылах	165	3,62	160	140	3,65	137	-24
Джалинда	236	2,52	217	236	2,18	209	-8
Жиганск	325	1,83	273	325	1,94	278	5
Джарджан	281	2,80	264	281	2,40	256	-8
Кюсюр	201	4,39	198	212	4,19	209	11
Верхоянск	314	0,757	167	336	0,787	183	16
Усть-Чаркы	325	1,17	224	325	1,02	207	-17
Усть-Мома	314	0,977	196	357	0,892	211	15
Оймякон	292	0,970	182	292	1,22	206	25
Сусуман	247	2,08	216	303	1,60	242	26

Норма годового испарения в среднем по району исследования за первый период составила – 241 мм, за второй период – 257 мм. Увеличение нормы испарения произошло почти на всех станциях, за исключением четырех: Саскылах, Джалинда, Джарджан и Усть-Чакры.

3.4 Вклады в изменения нормы испарения

Также представляет интерес расчет вкладов изменений количества осадков и температуры t_n в изменение нормы испарения и стока в процентном отношении. Из уравнений (2.23) – (2.25) видно, что испарение зависит только от P и t_n . Изменение испарения приближенно можно представить в виде [7]:

$$\Delta E = \frac{\partial E}{\partial t_{\text{п}}} \Delta t_{\text{п}} + \frac{\partial E}{\partial P} \Delta P, \quad (3.1)$$

Вклады в процентах можно определить по формулам [11]:

$$V_{tE} = \frac{100 \left| \frac{\partial E}{\partial t_{\text{п}}} \Delta t_{\text{п}} \right|}{\left| \frac{\partial E}{\partial t_{\text{п}}} \Delta t_{\text{п}} \right| + \left| \frac{\partial E}{\partial P} \Delta P \right|}, \quad (3.2)$$

$$V_{PE} = \frac{100 \left| \frac{\partial E}{\partial P} \Delta P \right|}{\left| \frac{\partial E}{\partial t_{\text{п}}} \Delta t_{\text{п}} \right| + \left| \frac{\partial E}{\partial P} \Delta P \right|}. \quad (3.3)$$

Производные, входящие в приведенные уравнения, определялись по следующим формулам

$$\frac{\partial E}{\partial P} = \left(1 + \frac{P}{E_0}\right) e^{-z}, \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t_{\text{п}}} = \frac{dE_0}{dt_{\text{п}}} (1 - e^{-z}) + E_0 e^{-z} \frac{\partial z}{\partial t_{\text{п}}}, \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t_{\text{п}}} = - \frac{dE_0}{dt_{\text{п}}} \frac{P}{E_0^2} \left(1 + \frac{P}{E_0}\right), \quad (3.6)$$

$$\frac{dE_0}{dt_{\text{п}}} = 16,8 [0,99 + (4,01 + 0,06 t_{\text{п}}) e^{0,11(6 - t_{\text{п}})}]. \quad (3.7)$$

Обеденные по данным формулам вклады представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Изменение испарения и определяющих его факторов, и вкладов изменений этих факторов в изменение испарения в АЗР

м/с	$\Delta t_{п},$ °С	$\Delta X,$ мм	$\Delta E,$ мм	$V_{inE},$ %	$V_{xE},$ %
Ковдор 22240	0,4	49	41	94,3	5,7
Вайда-Губа 22003	0,4	-40	43	99,6	0,4
Каневка 22249	0,2	-51	17	92,3	7,7
Кемь-Порт 22520	0,3	-23	14	84	16
Гридино 22422	0,3	-64	3	65,3	34,7
Сура 22676	0,1	14	11	96,5	3,5
Койнас 22583	0,2	28	21	96,4	3,6
Хоседа-Хард 23219	0,3	-41	35	100	0
Петрунь 23324	0,1	-62	6	82,7	17,3
Елецкая 23220	0,3	-58	30	98,5	1,5
Салехард 23330	0,3	43	31	94,5	5,5
Игарка 23274	-0,2	-44	-24	85,6	14,4
Туруханск 23472	0	-34	-8	0	100
Тура 24507	0	16	5	0	100
Хатанга 20891	0	-45	-8	0	100
Саскылах 21802	0,1	11	11	96,2	3,8
Джалинда 21908	0,2	19	16	12,8	87,2
Жиганск 24343	0	-28	-17	0	100
Джарджан 24143	0,4	13	15	45,1	54,9
Кюсюр 21921	0	41	25	0	100
Верхоянск 24266	0,1	-24	11	98	2
Усть-Чаркы 24371	0,1	39	21	16,1	83,9
Усть-Мома 24382	0,3	-7	12	88,5	11,5
Оймякон 24688	0,4	36	31	53,2	46,8
Сусуман 24790	0,7	-4	61	99,8	0,2

Определение значений вкладов показало, что значение ΔE , в среднем по территории АЗР, на 66.5 % определяется изменением температуры воздуха и на 33.5 % изменением годовых осадков (табл.2). Таким образом, можно сказать, что изменение среднего многолетнего испарения с поверхности суши в АЗР в основном определяется изменением температуры воздуха теплого периода года, а изменение осадков вносит значительно меньший вклад в изменение испарения. Это можно объяснить тем, что в АЗР достаточно высокое

увлажнение территории и испарение близко к испаряемости. Поэтому изменение осадков не может приводить к заметным изменениям испарения, изменение же температуры влечет изменение испаряемости и, одновременно, изменение испарения, которое следует за испаряемостью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка средних многолетних значений испарения в АЗР производилась путем сравнения их расчетных величин за два периода, первый из которых относится к эпохе стационарного, второй к эпохе быстро изменяющегося климата. Факторами, определяющими формирование испарения в настоящей работе, считались характеристика температуры воздуха теплого периода года t_n и годовые атмосферные осадки. Сравнение их за два периода показало, что почти повсеместно на территории АЗР произошло увеличение t_n , которое в среднем составило 0.2 °С. Изменение осадков на территории носит знакопеременный и достаточно хаотичный характер (трудно увидеть какую-либо закономерность в распределении этих изменений по территории). Среднее значение этих изменений по территории составило 10 мм. Почти повсеместно рассчитанные значения испарения за второй период увеличились по сравнению с первым. Среднее значение увеличения составило 16 мм. Если приведенные данные об изменениях выразить в относительных единицах, то можно сказать, что во второй период, по сравнению с первым, на территории АЗР произошло уменьшение осадков, примерно, на 0.8 %, увеличение испарения на 7.2 %. Оценка вкладов изменений температуры t_n и годовых осадков в изменение испарения показала, что изменение испарения на 66.5 % определяется изменением величины t_n и на 33.5 % – изменениями осадков. Такое распределение вкладов, по-видимому, можно объяснить тем, что территория АЗР имеет достаточно обильное увлажнение и поэтому изменение осадков не может приводить к заметному изменению испарения, в то время как изменение температуры при обильном увлажнении, наоборот, способно заметно изменять испарение.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Будыко, М. И. Климат и жизнь. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 472 с.
2. Вершинин А.П. Анализ и оценка современных методов определения испарения с природных ландшафтов. // Труды РГГМУ. – 1999. № 128. – С. 121 – 140.
3. Единый государственный фонд данных о состоянии окружающей среды, ее загрязнении [Электронный ресурс] / Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеоинформации – Мировой центр данных. – Режим доступа: *meteo.ru*, дата обращения 18.02.2024
4. Зубенок Л.И. Испарение на континентах. – Л.: Гидрометеиздат. 1976. – 263 с.
5. Константинов А.Р. Испарение в природе. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 531с.
6. Костин, С. И., Покровская, Т. В. Климатология. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 485 с.
7. Методы изучения и расчета водного баланса. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 396 с.
8. Ольдекоп Э.М. Об испарении с речных водосборов. – Юрьев, 1911. – 209с.
9. Постников, А. Н. К оценке среднемноголетнего суммарного испарения с поверхности суши на основе уравнений связи. // Труды РГГМУ. – 1999. № 123. – С. 141 – 152.
10. Постников, А. Н. Об использовании различных уравнений связи для определения норм годового испарения. // Ученые записки РГГМУ. – 2017. – №50. – С. 126 – 137.
11. Постников, А. Н. О влиянии изменений климата на речной сток и испарение в Арктической зоне России. // Заметки ученого. – 2023. – С. 343 – 347.

12. Постников, А. Н. Ориентировочные оценки изменений норм речного стока на территории России под влиянием изменения климата. // Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции “Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации” / РГГМУ. – Санкт-Петербург, 2019. – С. 268 – 269.
13. Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 96 с.
14. Тюрк Л. Баланс почвенной влаги. – Л.: Гидрометеоиздат, 1958. – 228с.