



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 Возможные изменения среднего  
многолетнего стока р. Дон под  
влиянием заданных изменений  
климата

Исполнитель Левакова Ульяна Олеговна  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель к.г.н., доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Постников Александр Николаевич  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

(подпись)

к.т.н., доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Хаустов Виталий Николаевич  
(фамилия, имя, отчество)

«13» июня 2022 г.

Санкт-Петербург  
2022

## Оглавление

Введение.....	3
Глава 1 Физико-географическая характеристика района .....	5
1.1 Общие сведения о бассейне.....	5
1.2 Рельеф территории бассейна р. Дон .....	5
1.3 Климат бассейна р. Дон .....	16
1.4 Гидрография .....	25
Глава 2 Цели и задачи работы. Методы решения поставленных задач .....	29
Глава 3 Результаты и анализ проведенных исследований.....	32
Заключение .....	41
Список используемых источников.....	43

## Введение

В настоящее время происходят направленные изменения климата в сторону потепления. Происходит повышение температуры атмосферы земного шара, что вызывает изменение составляющих и тепловых и водных балансов в различных регионах земного шара.

В 2016 г. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) выпускает «ДОКЛАД ОБ ОСОБЕННОСТЯХ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ЗА 2015 ГОД», где представлены результаты регулярного мониторинга климата территории Российской Федерации за 2015 г. и приведены данные о климатических величинах. По всем данным, которые мы имеем из центров по климату, он считается самым теплым в мировом масштабе. Скорость роста температуры в России за 10 лет составляет 0.45 °С. За период 1975-2015 гг. на территории России годовые осадки увеличивались на 2 % за 10 лет. В летние месяцы на территории Европейской части России (ЕЧР) нормы осадков уменьшились [2].

Естественно, что гидрологов, в данном случае и в первую очередь, интересует то, как отзываются на изменение климата составляющих водного баланса речных бассейнов. В настоящей работе мы попытаемся установить, насколько могут изменяться среднее многолетнее испарение и речной сток бассейна р. Дон, одной из крупных рек Европейской части России, при некоторых изменениях климата, которые мы сами задавали.

Факторами, вызывающими изменения испарения и стока у нас, считались изменения температуры воздуха и атмосферных осадков. Периоды, за которые мы производили оценку как факторов, так испарения и стока, мы взяли до 1960 г. и 1986-2015 гг.

Далее предполагалась следующая ситуация, что изменения климата в бас. р. Дон могут начаться, но мы не знаем в точности, как будут изменяться величины  $t$  и  $X$  (температура воздуха и осадки).

Мы допускаем различные варианты их изменений, и нам интересно узнать, что будет происходить с испарением и стоком при различных сочетаниях изменений температуры и осадков. Для определения испарения было использовано уравнение связи. За норму этой гидрометеорологической величины принималось среднее многолетнее значение испарения. Данные о стоке с Европейской части России за период, который рассматриваем как современный, не публикуются. И как следствие, сток рассчитывался за этот период как разность между осадками ( $X$ ) и испарением ( $E$ ). Аналогично и для периода, который считаем стационарным, для более удобной сравнительной характеристике. Значение осадков использовались с поправками на смачивание и ветровое выдувание. Для определения испаряемости ( $E_0$ ), была использована методика, разработанная на кафедре инженерной гидрологии нашего университета. Оценки испарения и речного стока, а также их изменения проведены для Верхней части Дона и Нижней, примерно по 10 станций с каждой части территории бассейна.

## Глава 1 Физико-географическая характеристика района

### 1.1 Общие сведения о бассейне

На Европейской части России расположен водосбор реки Дон, который составляет 422 тыс. км<sup>2</sup>. (369 тыс. км<sup>2</sup> или 87.4% площади бассейна) и Украины (53.0 тыс. км<sup>2</sup> или 12.6 % площади бассейна).

### 1.2 Рельеф территории бассейна р. Дон

Донской район по географическому положению, характеру рельефа местности и геологии можно разделить на две части (в настоящей работе представлено именно так): южная и северная. Волго-Донской канал проходит как раз на границе между этими частями (рисунок 1.2.1).

Верхняя часть района, которая имеет большую площадь, имеет довольно сложный, широко разнообразный рельеф и геологию. Часть, которая находится на Западе, занята Среднерусской возвышенностью, имеющая эрозионную возвышенную равнину. Она слабо наклонена на восток и заканчивается к долине рек Дона и Воронежа. Участки со скалами на правом берегу р. Дон названы именованиями гор.

Верхняя часть района, которая имеет большую площадь, имеет довольно сложный, широко разнообразный рельеф и геологию. Часть, которая находится на Западе, занята Среднерусской возвышенностью, имеющая эрозионную возвышенную равнину. Она слабо наклонена на восток и заканчивается к долине рек Дона и Воронежа. Участки со скалами на правом берегу р. Дон названы именованиями гор.

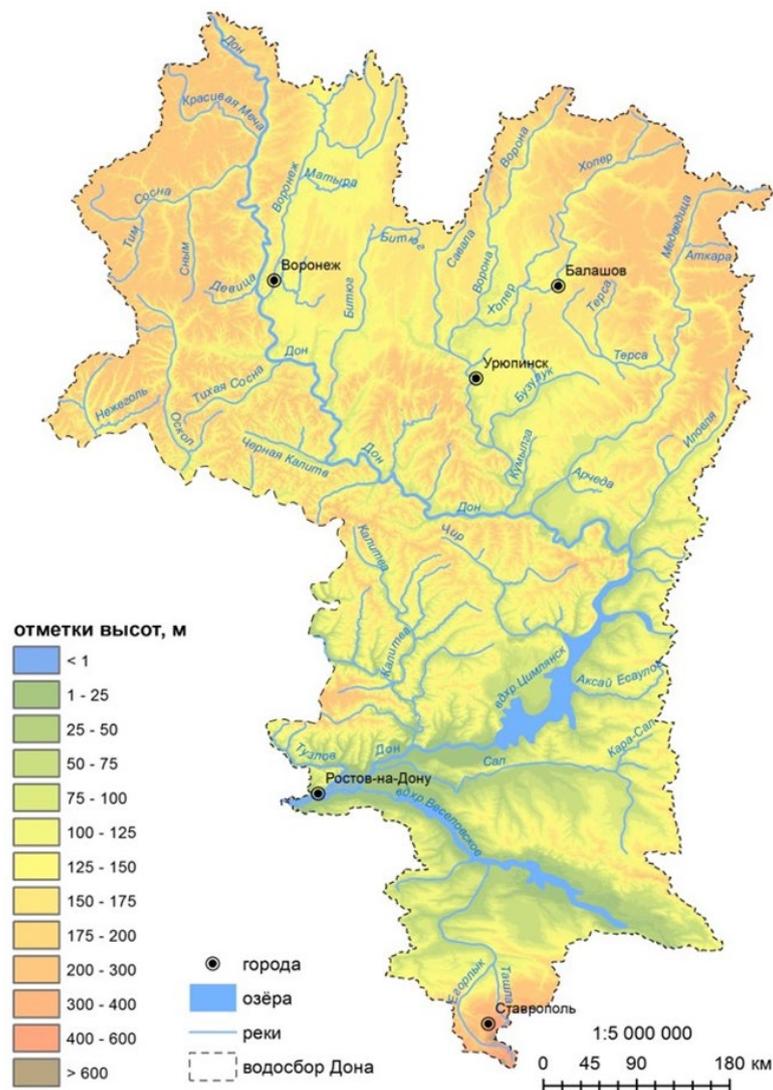


Рисунок 1.2 – Карта бассейна р. Дон с отметками высот (в м)

Относительные высоты Среднерусской возвышенности, достигающие почти 75-100 м повсеместно, определяются по глубинам вреза долины реки и балок. Так же, происходит увеличение в размерах до 125 м и более к южной части (это бассейны рек Тихой Сосны и Черной Калитвы) и от западной границы бассейна р. Дон.

Калачская возвышенность, которая находится между р. Дон и участком нижнего течения его притока р. Хопёр, представляет из себя плато, высота которого составляет от 200 до 230 м, разрезанное долинами рек, оврагами и

балками. Морфометрия и геология возвышенности подразумевает продолжение на восток Среднерусской возвышенности. Склон Калачской возвышенности, который находится на востоке, имеет высокий выступ (до 100-120 м) и заканчивается на долине р. Хопёр. Склоны, которые находятся на севере и западе, пологие (далее они переходят в надпойменные террасы Дона (западе и юге) и в поверхность Окско-Донской низменности (север)). На Приволжской возвышенности, точнее ее юге, находится восток бассейна р. Дон (р. Медведица, Хопёр, Иловля, Ворона). Представляет собой равнину, наклонённая на запад, которая имеет рельеф структурно-эрозионный. Граница бассейна простирается в верховье р. Медведицы до г. Волгограда, почти у р. Волги. Наибольшие абсолютные высоты с северной части становятся ниже, а с восточной части на запад наоборот – выше. У р. Карамыш (левый приток р. Медведицы) высоты абсолютные составляют 300-335 м. Водораздел бассейна р. Иловля с бассейном р. Волга проходит по гребню Приволжской возвышенности. От водораздела р. Иловли до р. Волги расстояние составляет всего 12 км [6]. Соответственно бассейн р. Иловли сложен аллювиальными отложениями, которые относятся к лихвинскому горизонту. Он может достигать до 7 м и залегает на серых глинах. Делювиальными отложениями сложен бассейн р. Медведицы мологосексинского (соминского) и осташковского горизонта. Мощность их составляет около 2,5 м, залегающие на мергелях мелового периода [7].

Окско-Донская низменность. Она расположена между Калачской, Приволжской, Среднерусской возвышенностями. Южную часть мы будем относить к бассейну Дона. Юго-восток ее продолжается до р. Медведица, прозвали как Хопёрско-Бузулукская равнина. Запад очерчивается границей низменности со Среднерусской возвышенностью. Здесь происходит сменяемость рыхлых песчано-глинистых отложений и выражены меловые отложения среднерусской возвышенности. Морфология ее такова тем, что у нее крутой выступ правых берегов рек Дона и Ворожен в сторону этой низменности. Юг низменности меняется своей геологией. Так, песчано-глинистые отложения

сменяются отложениями периода палеогена и периода мела. Если обобщить все написанное о ней, то можно сказать, что представляет собой моренную и аллювиальную равнину, естественно с речными рассечёнными долинами и лощинами (балками). Абсолютные высоты 150-175 м, некоторые сета превышают эти значения.

Арчединско-Донские пески. Располагаются на левом берегу р. Дон, между нижним течением р. Арчеды и Медведицы. Переветные аллювиальные пески слагают поверхность. А она, лишена речных долин и балок. Составляет до 50-60 м над р. Дон. Их можно найти в нижнем течении р. Иловля [4].

Дренирование на юге бассейна р. Дон происходит за счёт левых притоков с запада и севера Ставропольской возвышенности Ергени (является орографическим продолжением Приволжской возвышенности и границей восточной части бассейна Дона). Рельеф представляет собой ассиметричную возвышенность с пологими западными и крутыми восточными склонами. Левые притоки Дона, такие как, Сал, Маныч делят равнину между Ергенем и Доном на водоразделы. Повышение высот происходит с севера на юг и составляет 160-200 м, понижение высот происходит с запада до долины Дона. Самой длинной является Сальско-Манычская гряда (находится на востоке). Выражены асимметрией склонов. На севере они длинные и пологие, а на юге они короткие.

Кумо-Манычская впадина. Находится южнее выше описанной Сальско-Манычской гряды. Располагаются параллельно друг другу. Достигает в ширину до 20-30 км, так же считается глубокой. Имеет большое количество водных объектов, такие как, узкие озера, сухие котловины, болота, речные протоки, солончаки. Восток занимает большое оз. Маныч-Гудило. Посмотрев на карту, увидим, что на западе протекает р. Маныч. Описывая ее строение, определим как ассиметричное. Склон с правой стороны южной части – крутой с балками. Склон с левой стороны – пологий, похожий на низменность. Долины являются

террасированными в количестве четырех штук. Высоты варьируются 1, 5, 15 и 30 м.

Северный склон Ставропольской возвышенности определяет границу южной части бассейна р. Дон. Наивысшая точка бассейна составляет 650 м БС. Это находится в верховьях реки Егорлык у г. Ставрополя. Замечено дренирование на склонах рекой Егорлык и ее притоками, приходя к на север к Манычской впадине. Рассматривая рельеф этой части, наблюдаем эрозию пласта плато. Говоря о северной части, замечаем эрозию равнинную.

Описывая рельеф и геологическое строение правого берега Дона вниз по течению, выделим три участка [4]:

1) Северный участок. Расположен между р. Цимлой и р. Аксенец. Относится к Цимлянскому водохранилищу. Его занимают Цимлянские пески – крупный песчаный массив. Высота составляет до 58 м.

2) Средний участок. Расположен от цимлянских песков к западу. Рассечен правыми притоками р. Дон. Высота составляет 188 м.

3) Южный участок. Располагается на юго-западной территории бассейна р. Дон от низовьев р. Северского Донца.

Формы рельефа, такие как, речные долины, балки, овраги, карстовые образования, западины, оползни являются основными для водосбора р. Дон.

Типы речных долин правого берега р. Дон:

1) Долина северных притоков (рек Красивой Мечи и Сосны). Относительно узкие, не широкие поймы, развитые в толще девонских известняков, и слабо выраженные вписанные террасы, из которых обычно есть только первая терраса, которая, как и поймы, расположена в пределах излучины реки. Террасы в основном сложены аллювиально-делювиальной глиной мощностью до 3-4 м, в основании которой находятся известняки. Поверхность

террас довольно круто опускается к руслу реки и часто переходит в пойму без ярко выраженного уступа.

2) Долина в толще пясчсго мела и мергеля. К ним относятся долины рек Девица, Потудани, Тихая Сосна, Черная Калитва и Богучарка. Эти долины, несмотря на их более молодой возраст, спроектированы лучше, чем долины в известняках. На той же глубине они шире, прямее и имеют гораздо более выраженную асимметрию склонов. Правые склоны крутые, часто с меловыми отметками, левые более пологие. В этих долинах поймы с озерами претерпели достаточное развитие.

3) Долина р. Чир. Залегаеа преимущественно в толще песчано-глинистых отложений палеогена и только в верховьях, где вскрываются меловые и меловидные отложения. Он почти везде имеет крутые правые склоны, широкую пойму со множеством древних озер и крытых террас, развитых в основном на левом берегу.

Ко второму морфологическому типу долин относятся также долины рек Калачской возвышенности (бассейны рек Подгорное, Осередь, Песковатки). Они также глубоко прорезают верхнюю толщу мела и мергеля и имеют хорошо выраженную асимметрию склонов в случае нормально развитых пойм и надпойменных террас.

Однородная эрозионная сеть с речными долинами образована балками, в которых нет постоянных водотоков. Многие балки Среднерусского и Калачской возвышенности морфологически имеют черты небольших речных долин, т.е. довольно широкое дно, но с сухим, углубленным руслом, хорошо выраженной асимметрией склонов, а иногда и террасированными ступенями на более пологом склоне.

Левый берег Дона, где находится Окско-Донская низменность, многообразен речными долинами Битюга, Воронежа, Елани, Хопра, Вороны отличен от правого берега. Он слагается в условиях легко размываемых рыхлых

песчано-глинистых пород. Так же относительные высоты местности – небольшие. Образовались широкие долины с террасами над поймой реки. Они достигают размера в 3 км. Относятся такие реки как Битюг, Воронеж, Хопёр. Долины эти ассиметричные, кроме как в верховьях.

Приволжская возвышенность бассейна р. Дон разнообразна развитыми долинами в верхнем течении р. Ворона и Хопёр, Медведица, Иловля, и так же у них ассиметричное строение. Их правые склоны приподнятые, крутые, левые пологие с рядом крытых террас. Имеют широкий размер поймы. К р. Волге присоединяются долины рек Иловли и Медведицы в верхнем их течении. Эрозия сейчас активнее происходит в верхнем течении р. Волга на самом склоне водораздела. Происходит сдвиг линии водораздела [5].

Опишем рельеф возвышенности Приволжской как расчленённый с сетью балок. Сток с поверхности бассейна получается лучшим способом за счёт оврагов, так как являются молодыми образованиями (за последние столетие). Балки являются древней формой эрозии. Склоны молодых образований обычно представлены без почвенно-растительного покрова. Поэтому частое явление смыв и размыв в виде наносов в более древнюю форму – балок и реки. На таких территориях как Среднерусской возвышенности, Калачской и Приволжской овраги можно встретить почти везде, но больше всего на Среднерусской на востоке. Размеры их составляют 20 м и больше. Слагают их делювиальные суглинки или по-другому называют балочный аллювий, так же встречаются коренные породы [4], [6].

Областью, где почти не развиты овраги, является Окско-Донской низменность на западе и центральной части. На юге этой области, ниже г. Воронеж, овраги все-таки присутствуют, где находятся реки Ворона и Битюг. Эрозия на западе Ергеней слабовыраженная.

На правом берегу в области яров р. Медведицы преобладает овражный тип, так же на этой стороне Дона вниз по течению, где долины р. Цимлы [4], [7].

Карстовые образования образуют формы рельефа. Распространены на севере бассейна р. Дон., опять же на таких возвышенностях как Среднерусская и немного на Калачской. Они выражаются в виде водопоглощающих воронок или глухих балок, которые обычно заканчиваются одной или несколькими воронками.

Область рек Красивой Мечи и Сосны располагают большим количеством карстовых образований такими как воронки и слепые долины (балки). Больше количество находится на притоках левого назначения Сосны (Большая Чернавы и Варгола). Множество карстовых воронок расположено как на правом, так и на левом берегу реки Дон в Галицкой области. В этом районе карстовые воронки связаны с близостью известняковой поверхности елецких пластов, которые здесь достигают значительной мощности и расположены почти повсеместно на перекрытиях из бревен и балок. Отдельные карстовые воронки встречаются также в промежуточных землях Дона и Воронежа. К югу от бассейна р. Сосны карстовые воронки, связанные с верхнедевонскими известняками, становятся менее частыми и исчезают в ширину Воронежа [3].

Карст из меловых пород распространён на юге Среднерусской возвышенности и на части Калачской возвышенности. Именно развивается в породах писчего мела. Обычное его образование – воронки. Слепых долин не образуется.

Отличительными конфигурациями многочисленных тонких междуречных мест водоема Дона считаются западины – закрытые углубления плоскости, как правило выпуклой либо округлой фигуры. Достигают они несколько десятков до сотен метров. В глубь достигают размеров до 1-2 м. Эти углубления обычно заняты озёрами временного характера, а бывает, что и постоянные там есть. Так же часто они заболочены. Они относятся к степной зоне, но выделяются древесными и кустарниковыми растениями. Польза этой конфигурации в

удержании стока дождевых и талых вод. Что способствует обводнению территории степей.

Распределение этих конфигураций обычно находится на Окско-Донской низменности, где располагается р. Икорца и р. Битюг. Отдельно их можно встретить на Среднерусской возвышенности, где есть р. Дон и р. Воронеж.

Широкая распространенность в бассейне Дон сравнительно слабо растворимой и трещины карбонатной породы – причина развития карстовых феноменов здесь. Процесс закарстывания также способствует общим приподнятым местностям и сильным эрозионным расчленением, что связано с интенсивным сносом покровной некарстовой породы. Результат карстового процесса – возникновение своего рода подземных морфологических и гидрографических процессов, которые играют важную роль при формировании водного режима, стока рек [7].

На указанной территории выделены два района карста: Верхний Донской район карста известняков и Средний Донской район карста мелового.

Верхне-Донской район известнякового карста приурочен к южному крылу Московской синеклизы, сложенному верхнедевонскими и нижнекарбонными известковистыми породами, пласты которых слабо наклонены на север. Граница его проходит: на востоке - по долине р. Дона, за исключением Лебедянского района, где она отодвигается к востоку; на западе и северо – западе - по водоразделу между бассейнами рек Дона и Оки; на юге - южнее долины Сосны, примерно на широте г. Задонска. (Карстовые явления этого района по существу без изменений продолжаются на запад и север в пределы бассейна Оки.) Общая мощность известняков изменяется от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Обнажаются они лишь в долинах рек и на склонах – крупных балок. На водоразделах же известняки скрыты под толщами рыхлых отложений, но в верховьях балок и ложинообразных понижениях довольно близко подходят к дневной поверхности, где в них легко проникают атмосферные воды [4], [7].

Водопоглощение воронок и неких провалов являются основным фактом карста Верхне-Донской территории. Повсеместно там пропадают русла ручьёв, наличие так же трещиновато-карстовых источников. Талые и дождевые воды, на самом деле, из-за этого в принципе не уходят в большом количестве в зоны, где формируется сток (прошла экспедиция). Накапливаясь в толщах известняков, они образуют местные обильные водоносные горизонты, выклинивающиеся в речных долинах и питающие реки в межень. При положении подземных пустот на уровне или ниже вреза речной сети они являются проводниками и коллекторами подземных вод и открываются многочисленными и сильными источниками по долинам рек Дона, Сосны, Красивой Мечи и их притоков.

Средне-Донской район мелового карста расположен на восточном крыле Воронежской антеклизы, орографически совпадающем с восточным склоном центральной и южной частей Среднерусской возвышенности и Доно-Хоперского плато (Калачской возвышенности), и сложен мезозойскими и третичными отложениями, среди которых развиты толщи карбонатных пород - песчистый мел, мергели и мелоподобные породы, относящиеся к верхнему мелу. Мощность этих пород быстро нарастает с севера на юг от 10-30 до 50-100 м и более. Район охватывает правобережную часть бассейна Дона и Доно-Хоперское междуречье. Меловые породы перекрываются песчано-глинистыми отложениями палеогена, сохранившимся на наиболее приподнятых участках междуречий. Речные долины, балки, а иногда и овраги прорезают палеогеновую толщу и врезаются в меловые отложения. На склонах долин и балок повсеместно обнажены меловые породы. На водораздельных плато коренные породы перекрыты плащом покровных лёссовидных суглинков. Последние хорошо фильтруют атмосферные воды и не создают существенных препятствий для проникновения их в толщи карстующихся пород. Большое разнообразие условий карстования в Средне-Донском районе является причиной наиболее характерной черты карста района - крайне спорадическое распространение карстовых явлений по территории района, большая их изреженность. Даже в местах, где более или менее развит

карст, его формы встречаются единичными образованиями или, реже, небольшими группами. В силу этого в районе почти нет типичных карстовых ландшафтов, со всеми присущими им формами и явлениями. Меловые водораздельные плато отличаются бедностью поверхностных вод, а иногда и полным их отсутствием. Подземные воды здесь, как правило, залегают глубоко.

Карст в условиях Донского бассейна способствует переводу поверхностного стока в подземный, и, следовательно, увеличивает запасы подземных вод. Последнее благоприятно сказывается на питании рек в меженный период [4], [7].

Почвы. Обширная территория Донского района неоднородна по своему почвенному покрову и характеризуется ясно выраженной зональностью почв, которая прослеживается в последовательной смене почвенных типов в направлении с северо-северо-запада на юго-юго-восток. Река Дон пересекает три почвенно-географических зоны: лесостепную зону оподзоленных, выщелоченных и типичных черноземов, степную зону обыкновенных и южных черноземов и сухостепную зону темно-каштановых и каштановых почв.

Также наблюдается различие особенностей почвы при переходе от запада к востоку и различие распределения почв по местным условиям. Эти локальные условия проявляются при различении почв высокой водораздельной зоны и низших равнинных участков. На высокой водораздельной территории Среднерусского и Приволжского склонов в основном распространяется серая лесная почва, подзоленная и выщербленная черноземная почва. Окско-Донская низменность характеризуется развитием выщелоченных, типичных, обыкновенных и южных черноземов и лугово-черноземных почв. Для низменности свойственны большая постепенность перехода между указанными подтипами черноземов и комплексность почвенного покрова, связанная с сильно развитым микрорельефом. Многочисленные степные западины и плоские ложбины имеют почвенный покров, представленный корковыми, солонцами,

солодями и серыми осолоделыми лесными почвами. Долины рек в поймах отличаются сложным почвенным покровом из аллювиально-луговых и луговых почв; на речных террасах располагаются полосы песчаных и супесчаных почв. В связи с большим разнообразием почв, в пределах каждой почвенной зоны, выделяются крупные почвенные районы [4], [6].

### 1.3 Климат бассейна р. Дон

Климат Европейской территории (ЕТР) зависит от действия ветров Атлантического океана. В холодное время на этой части дуют ветра с юга-запада, что позволяет тепловому атлантическому воздуху прийти на территорию. Запад и северо-запад является целью этих ветров. Таким образом, изотермы в зимний период времени направлены с северо-запада на юго-восток. Осадки зимой значительно связаны с данным атлантическим воздухом. Активизируется атлантический воздух при циклонах, которые продвигаются с запада на восток. Средняя часть и север, и особенно запад Европейской территории характеризуется большим выпадением осадков. Степные районы, а это юг и юго-восток характеризуются редким появлением циклонов. Значит эти районы характеризуются высоким давлением в зимний период. Направления восточного и юго-восточных ветров преобладают в степных зонах, для нее не характерна облачность и большое количество осадков.

Средне-месячные температуры воздуха в летний период времени немного повышаются по направлению к востоку. Изотермы, летнего месяца июля, направлены с западо-юго-запада на востоко-северо-восток. Чем же характеризуется этот летний период? Влияние атлантического воздуха на западную часть, а он в это время холодный. Так же влияние на восток территории теплого континентального воздуха.

На запад и юго-западе территории Европейской части СССР наблюдается значительное выпадение количество осадков в летний период до 80-90 мм за июль. Средняя часть так же выделяется результатами до 60-70 мм за июль. Юго-восток характеризуется меньшим количеством осадков до 20-30 мм за июль. Циклоны направлены с юго-запада на северо-восток [1].

Средняя часть описываемой территории простирается в зонах таежных и широколиственных лесов и лесостепей, поэтому тут теплый климат. Запад, в зимнее время года, охвачен атлантическим воздухом, а восток – континентальным с юга-востока. Редкость для этой части арктический воздух.

Большое количество осадков в данной части Европейской территории выпадает на западе из-за частоты циклонов. Оценка климата как благоприятный для произрастания деревьев и кустарников, характерной для этой зоны (ясень, клен, дуб). Изменений условий мы ждем именно с запада на восток.

Калининская, Московская, Тульская область находятся в самом центре средней части Европейской территории. На их климат влияет континентальный воздух умеренных широт, который наиболее распространён на данной территории в теплый период года. Преобладает морская воздушная масса умеренных широт в зимнее время года. Она влечёт за собой снегопады и увеличение температуры. Морозы и заморозки, прохладу в отдельные периоды времен года происходят из-за арктической воздушной массы. Естественно, характеризуется низшими значениями температур – 40 °С, – 45 °С. Средние значения января составляют примерно – 10 °С, – 11 °С. Температуры июля составляют примерно 17-18 °С. Рельеф не дает осадкам распределяться равномерно по всей территории. Валдайская возвышенность отличается большим количеством осадков (600 мм и выше). Годовая сумма осадков в других районах около 500-550 мм [1].

Климат зоны р. Дон формируется под воздействием солнечной радиации, атмосферной циркуляции и подстилающей поверхности. Радиационные факторы

в основном определяют тепловой баланс, циркуляцию - увлажнение. Циркуляция также оказывает влияние на температуру воздуха, особенно в зимний сезон, когда воздействие радиации значительно снижается из-за непродолжительной продолжительности солнечного света.

По географическому положению рассматриваемая территория находится под воздействием различных по физическим свойствам и происхождению воздушных масс: холодных из Арктики, морских с Атлантики, сухих из Казахстана, тропических со Средиземного бассейна. Начало зимних синоптических процессов связано с вторжением воздуха из Арктики. Увеличивающаяся повторяемость этих вторжений вызывает резкие похолодания и морозы. С установлением зимы преобладает влияние западного отрога сибирского антициклона, который обеспечивает в бассейне Дона интенсивное выхолаживание, низкие температуры и холодные ветры восточной составляющей. Сибирский антициклон нередко пополняется антициклонами, продвигающимися главным образом из Арктики. Затоки воздуха из Атлантики, Средиземного и Черного морей приносят на территорию бассейна оттепели, значительные осадки, гололеды и метели. Циклоническая деятельность в зимний период обуславливает облачность и значительные осадки, снег. Атлантический воздух охлаждается над снежным покровом и теряет часть своей влаги. Арктический воздух прогревается и становится более влажным. В весенний период характерной чертой циркуляции является меридиональный перенос, ослабление азиатского термического максимума. Над Атлантикой усиливается Азорский антициклон. Средиземноморские циклоны получают возможность продвигаться к северо-востоку. Связанные с ними выносы теплых воздушных масс с юга и юго-запада способствуют быстрому росту температуры воздуха, оттаиванию и прогреванию почвы. Повышению температуры воздуха способствуют в значительной степени процессы трансформации воздушных масс, хотя в начале весны они играют меньшую роль, чем процессы адвекции. Адвекция арктического воздуха, возникающая в тылу проходящих циклонов и

распространяющаяся далеко на юг, обуславливает также возвраты холодов. Отличительной чертой весенней циркуляции является большая изменчивость синоптических процессов и быстрая смена воздушных масс. Летом повышается роль радиационного фактора и подстилающей поверхности. Циркуляция ослабевает. Непосредственные вторжения арктического воздуха почти прекращаются и усиливается влияние азорского антициклона. Атлантический воздух поступает на территорию района также в тылу атлантических циклонов. Летние процессы, как правило, продолжаются до середины августа, после чего влияние азорского максимума и его отрогов ослабевает и начинают усиливаться затоки холодного арктического воздуха. В начале осени с ослаблением притока радиации уменьшается прогревание почвы и нижних слоев воздуха; постепенно оно сменяется выхолаживанием. В ходе осени все чаще наблюдается переход к зимним типам циркуляции. Для поздней осени характерно усиление циклонической деятельности. Антициклоны, приходящие осенью обычно с севера и северо-запада, являются причиной первых заморозков [3].

На термический режим воздуха, помимо основных факторов, атмосферной циркуляции и радиационного режима, оказывают влияние местные факторы: мезо- и микрорельеф, растительность, почва, близость водоемов, застройка территории. Благодаря их воздействию температурные условия могут существенно меняться на расстоянии сотен метров, а иногда и нескольких километров. Значительная протяженность с юга на север бассейна Дона обуславливает большой диапазон температуры воздуха и приводит к необходимости при характеристике температурного режима выделять северную и южную части.

Температура воздуха. Средняя многолетняя годовая температура воздуха в бассейне Дона равномерно изменяется по территории от 4° на севере до 10° на юге. Низший предел средней температуры отмечался в январе (-11.0 °С – -4.9 °С). Минимум абсолютной величины составил -40 °С – -33 °С. Июль месяц, средние температуры которого изменяются от 19.4° С на севере, до 23.8° С на

юге. Абсолютный максимум температуры наблюдался  $38^{\circ}\text{C}$  на севере и  $42^{\circ}\text{C}$  на юге Донского бассейна.

Изменения климата на южном склоне Европейской территории России (ЕТР), в том числе в бассейне р. Дон, за последние десятилетия проявились, прежде всего, в потеплении в зимний период [2], [6].

Материалы наблюдений в пунктах размещения воднобалансовых станций Росгидромета Нижнедевицкой (лесостепная зона) и Каменная Степь (степная зона) в бассейне р. Дон свидетельствуют, что после относительно стабильного периода колебаний температуры воздуха до середины - конца 1970-х годов начался ее рост. При этом в ряду наблюдений выделяется 1987 год, когда наблюдалась исключительно суровая для этих природных зон зима, лишь ненамного уступающая самой холодной за период наблюдений зиме 1942 года. То есть на общем фоне повышенных относительно периода до 1977 года температур воздуха не исключены отдельные годы с низкими и даже экстремально низкими температурами воздуха. Рост годовой температуры воздуха обусловлен потеплением всех сезонов. Следует отметить, что средние месячные температуры воздуха летнего сезона были в среднем несколько ниже, чем в 1950-е – 1970-е годы, вплоть до 2008 года. Их превышение над среднемесячным уровнем температур воздуха произошло только в последнее десятилетие. Наиболее значительный рост температуры воздуха произошел в январе-феврале и марте. При этом средние месячные величины температур воздуха в марте и ноябре в последнее десятилетие приближаются к нулевой отметке.

Наиболее сильный рост средних температур холодного периода произошел в бассейне Среднего Дона и Северского Донца [6]. В последние десятилетия оттепели в бассейне Дона носят регулярный характер. В течение 2007-2016 г. г. в бассейне Верхнего и Среднего Дона количество дней с отрицательными температурами уменьшилось на 15-20 суток и более.

Изменения климата отражается и в росте сумм положительных температур воздуха за период с ноября по февраль. Наибольший рост суммы положительных температур до 160-190°С наблюдается в бассейнах Среднего Дона и Северского Донца. На севере бассейна она составляет 50-80°С. В бассейне Нижнего Дона (левобережье) сумма положительных температур за зиму практически не изменилась и составила в среднем 290-300°С [6].

Осень на территории бассейна Дона длится 60-70 дней. Морозный период начинается в первой – второй декадах ноября на Верхнем и Среднем Дону и в конце ноября – начале декабря на Нижнем Дону. В качестве холодного периода, как правило, рассматривается период с 1 ноября по конец февраля. Изменение сроков окончания холодного периода связано с происходящими современными климатическими изменениями, так, в последние десятилетия, продолжительность устойчивого морозного периода сокращается со скоростью 1-4 дня в 10 лет и составляет 60-110 дней [6].

Атмосферные осадки. Значительная площадь водосбора Дона и его протяженность с севера на юг в сочетании с разнообразными формами рельефа приводят к сложной картине пространственного распределения осадков. Основная сумма осадков в бассейне Дона выпадает при прохождении атлантических циклонов. Среднегодовое количество осадков увеличивается с юго-востока на северо-запад от 350 до 600 мм. Наибольшее количество осадков за год на всей территории бассейна Дона составляет 700-800 мм. В годовом ходе осадков их максимум наблюдается летом. На севере бассейна он относится к июлю, когда месячная сумма осадков в среднем составляет около 55-70 мм, южнее - к июню, когда за месяц выпадает 40-60 мм. Минимальное количество осадков (20-30 мм-за месяц) на всей территории выпадает в феврале-марте. На холодный период приходится всего 100- 150 мм осадков, при этом количество их уменьшается с запада на восток. Суммы твердых осадков с ноября по февраль увеличивается от 40-60 мм в низовьях Дона до 90-110 мм в его верховьях и крупных левых притоков. Жидкие осадки в холодный период убывают с юго-

запада на северо-восток бассейна от 120 до 40 мм. В теплое время года характер распределения осадков по территории сохраняется такой же, как и в холодное время, но осадков выпадает больше – от 200 мм на востоке до 350 мм на северо-западе. Максимальное суточное количество осадков чаще всего наблюдается в июне и июле. Количественное распределение суточных максимумов осадков по территории неравномерно за счет ливневых осадков и колеблется в пределах 50-100 мм [4].

Атмосферные осадки за период 1976-2015 гг. представлены в монографии Водных ресурсов бассейна р. Дон [8]. По указанному анализу в целом по всем метеорологическим станциям бассейна Дона и всем периодам года, теплые и холодные периоды не имели статистически значимых изменений тренда. В то же время практически во всех бассейнах Дона количество влажных осадков в процентной зависимости от годового объема за период мониторинга 1976-2019 годов снизилось, в частности, в западном бассейне до 30 процентов, в частности, в западном бассейне до 30 процентов.

Приведем станции Росгидромета: Каменная Степь и Нижнедевицкая. Изменение годовых сумм осадков происходит в сторону увеличения. А это районы степей и лесостепей, довольно нетипичные значения. Величины годовых осадков достигали 600-800 мм. Но также встречаются и нормы для этих районов, они равны 500 мм и менее. В 2000 г. эти значения не понижались до 400 мм.

Зима – это тот период, когда в зоне недостаточного увлажнения бассейна р. Дон происходит рост количества осадков. С декабря на станции Каменная Степь значение осадков увеличилось до 148 мм. Летом и осенью произошло понижение значений, а также в таких месяцах как июль и август.

Говоря о снежном покрове, основное питание получает река Дон и притоки в период снеготаяния весной. Значительная длина бассейна Дон по ширине и рельефу обусловлена неравномерностью и плотностью распределения снежных покровов на ее территории.

Снежный покров появляется в северной части бассейна в первой половине октября, в южной - в конце ноября - начале декабря. Первый снег обычно тает с возвратом тепла. Устойчивый снежный покров образуется на севере территории в начале декабря, а в ее южных районах - в конце декабря. Сроки установления и схода, а также высота снежного покрова в значительной степени зависят от погодных условий каждого года и поэтому в отдельные годы значительно отличаются от средних многолетних. Наибольшая продолжительность периода со снежным покровом, составляющая 120-140 дней, и наибольшая высота снега 20- 35 см наблюдаются в северной части бассейна. К югу число дней со снежным покровом уменьшается до 100 дней, а его высота до 15- 20 см. Наиболее интенсивный рост снежного покрова наблюдается от декабря к январю. Максимальной высоты он достигает во второй и третьей декадах марта на севере бассейна и во второй и третьей декадах февраля на юге. Разнообразные формы поверхности бассейна и овражно-балочный характер микрорельефа местности сказываются на распределении снежного покрова по территории, а ветер способствует его перераспределению. С повышенных и открытых мест снег сдувается в овраги, долины, котловины, к подножию возвышенности и накапливается в лесу. Одной из основных характеристик снежного покрова является плотность. От плотности снега зависит запас воды в снежном покрове. По мере роста снежного покрова под влиянием оттепелей, ветра и собственной тяжести происходит увеличение его плотности до 0,27- 0,41 г/см<sup>3</sup> в верховьях р. Дона и 0,24-0,31 г/см<sup>3</sup> в его низовьях. Средний из наибольших за зиму запас воды в снежном покрове, как и его плотность, изменяется в бассейне Дона по широте, уменьшаясь с севера на юг от 110 до 30 мм. Со второй декады марта высота снежного покрова начинает уменьшаться. В южном направлении дата разрушения снежного покрова смещается на более ранние сроки. На большей части территории снежный покров разрушается в конце февраля - начале марта. Разрушение и сход снежного покрова протекает гораздо быстрее, чем его образование. В конце первой декады апреля, как правило, весь бассейн

освобождается от снега [4]. В связи с наблюдающимся потеплением в период с 1976 по 2019 гг. в центральных областях ЕТР выявлена тенденция уменьшения продолжительности залегания снежного покрова, более раннего его схода (-2,6 дней/10 лет) и более позднего появления (10 лет). В зимний период не наблюдается увеличение снегозапасов, что связано с ростом сумм положительных температур в холодный период, а также изменением соотношения жидких и твердых осадков в указанный период. Эта тенденция сопровождается уменьшением на 8%/10 лет максимального запаса воды в снеге [2], [6]. В то же время в 2019 году в бассейнах рек Хопра и Медведицы, выше Цимлянского водохранилища, запасы воды в снеге составили 215-260% нормы [2].

Запас снега в количественной характеристике очень изменчив на территории бассейна Дона. Для бассейна Верхнего и Среднего Дона коэффициент их вариации ( $C_v$ ) составляет 0,4-0,5, а южнее в бассейне Северского Донца и Нижнего Дона увеличивается до 0,6-0,7. Такое отличие обусловлено выпадением жидких осадков в зимний период и сильным влиянием оттепелей, имеющих большую повторяемость в лесостепной и степной зонах [6]. Так по данным воднобалансовой станции Каменная Степь, в среднем за 1978-2016 годы, предвесенние запасы воды в снеге снизились на 11 мм по сравнению с предыдущим многолетним периодом из-за оттепелей и более короткого зимнего периода.

Изменение испарения достигает от 300 до 500 мм. Зимний период года отличается минимальными значениями, то есть 1% от годовой суммы. Максимум испарения приходится на такие месяцы как май-июнь, а рост его значения начинается с марта, то есть примерно 20 % от годовой суммы. Изменчивость значения испарения в сторону сокращения начинается с июля. Так же происходит такое явление как испарения снега (50 % от максимума запаса воды в снеге) [5].

Ветер, солнечная радиация и дефицит влажности воздуха – основные факторы, которые влияют на испарение с поверхности почвы и воды. Второстепенным фактором является температура воздуха, которая характеризует длительность периода испарения в течение года.

Низший порог уровня дефицита влажности бассейна р. Дон достиг к 1990 году, а начало понижения происходило с семидесятых годов. Произошло это из-за снижения прихода солнечной радиации на территорию Европейской части России. Высокий уровень радиации был установлен в шестидесятых годах, но 2000 год не смог превзойти его, хотя солнечная радиация стабилизировалась.

Температуры воздуха с неотрицательным знаком способствовали увеличению значения испарения с поверхности почвы в зоне, где господствует семиаридный климат. В период с апреля по ноябрь заметно испарение с поверхности почвы (за эти за 10 лет). В сравнение с годами 1950-1960 гг., длительность теплых месяцев с каждым разом всё увеличивается. Уже температурное положительное значение встречалось в марте с 2002 г.

Испарение с водной поверхности на Верхнем Дону составляет 535 -755 мм, на Среднем - 755-985 мм, и на Нижнем – 985-1100 мм, увеличиваясь с севера на юг [5].

#### 1.4 Гидрография

Расположение водосбора р. Дон начинается на севере Среднерусской возвышенности и доходит до южных границ Ставропольского плато. Так же границы начинаются на западе Донецкого края, а заканчивается на Приволжской, Калачской и Ергенинской возвышенностях на восточной части. Длина с северного направления до южного достигает 800 км, а с западного направления на восточное 600 км. Исток реки начинается у Иван-озера, близ г. Епифани на северной окраине Среднерусской возвышенности на территории

Тульской области отметка которого 179 м БС, протекает на расстоянии 1870 км и впадает в Таганрогский залив Азовского моря в 45 км ниже г. Ростова-на-Дону.

Три части можно выделить на этом бассейне: верхний, средний и нижний. Верхний Дон – участок р. Дон от истока до г. Лиски, имеет длину 470 км при общем уклоне 0.0002 и площади водосбора 70 тыс. км<sup>2</sup> (16.7% от общего). Значительными притоками р. Дон в верховьях течения являются: Красивая Меча, Сосна и Воронеж.

Средний Дон - участок р. Дон от г. Лиски до г. Калач на Дону, имеет длину 900 км при общем уклоне 0.00006 с водосборной площадью 152 тыс. км<sup>2</sup> (36% от общей). На среднем участке р. Дон принимает группу значительных притоков: Битюг, Хопер, Медведицу, Иловлю и другие.

Нижний Дон – участок р. Дон от г. Калач на Дону до устья, протяжённостью 500 км при общем уклоне 0.000056 с прилегающей водосборной площадью 200 тыс. км<sup>2</sup> (без Украины и части территории Белгородской и Курской областей в верховьях Северского Донца – 127 тыс. км<sup>2</sup>). На Нижнем Дону после строительства Цимлянского гидроузла (1952 г.) на участке от ст. Цимлянской до г. Калач на Дону образовано Цимлянское водохранилище длиной 360 км, площадью при нормальном подпорном уровне - 2702 км<sup>2</sup>. Ниже плотины Цимлянского водохранилища начинается широкая (до 20 км) пойма Нижнего Дона протяженностью 240 км, изрезанная протоками и ериками, интенсивно используемая сельским и рыбным хозяйством. Отметки поймы изменяются от 0-1 м Б С в дельте до 15-16 м БС у плотины Цимлянского водохранилища. Русло реки на Нижнем Дону обладает большой подвижностью в сравнении с Верхним и Средним Доном. Перекатов здесь меньше, глубины на плесах составляют 4-6 м, на перекатах уменьшаются до 0,7 м. Ниже г. Ростова-на-Дону начинается дельта с большим количеством рукавов и проток. Самым крупным притоком на участке Нижнего Дона является Северский Донец длиной 1053 км и площадью водосбора 98.9 тыс. км<sup>2</sup>. Кроме того, на этом участке в Дон

впадают реки Чир, Цимла, Сал, Западный Маныч и Тузлов. Наиболее значительными притоками р. Северский Донец являются р. Уда, Оскол, Казенный Торец, Айдар, Деркул, Калитва [4].

Лесостепь, степь, полупустыня – природные зоны, расположенные в частях бассейна р. Дон (рис. 1.4.1).

Верхняя часть района, которая имеет большую площадь, имеет довольно сложный, широко разнообразный рельеф и геологию. Часть, которая находится на Западе, занята Среднерусской возвышенностью, имеющая эрозионную возвышенную равнину. Она слабо наклонена на восток и заканчивается к долине рек Дона и Воронежа. Участки со скалами на правом берегу р. Дон названы именованиями гор.

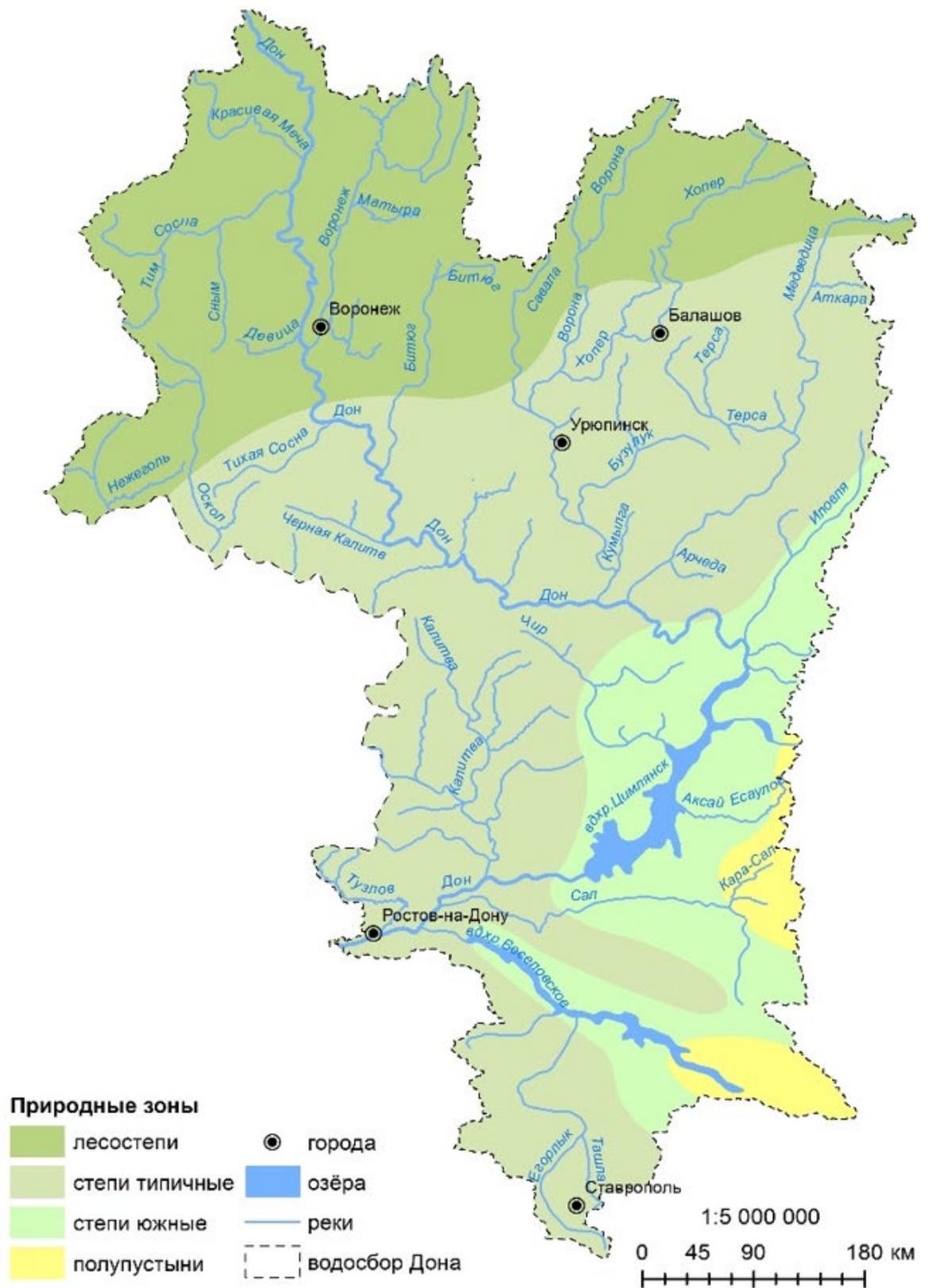


Рисунок 1.4.1 – Деление на природные зоны бассейна р. Дон

## Глава 2 Цели и задачи работы. Методы решения поставленных задач

Как уже отмечалось во введении, мы живем в эпоху нестационарного климата, изменяющегося в сторону потепления. Повышается температура атмосферы в планетарном масштабе, что влечет за собой изменения полей температуры воздуха и атмосферных осадков на территории различных регионов. Эти изменения вызывают вариации годовых норм составляющих водного баланса. Как в научном, так и в практическом плане небезынтересно иметь представление о насколько чувствительны к этим изменениям такие важнейшие составляющие водного баланса речных бассейнов, как испарение с его территории, так и сам речной сток.

В качестве объекта исследований с настоящей работе был избран бассейн р. Дон. При этом ставились задачи. Во-первых, нам хотелось выяснить, сколь заметны изменения стока и испарения с его бассейна при тех или иных заданных изменениях, определяющих эти величины факторов. Во-вторых, ставилась задача определения расчетным путем испарения и стока за последние десятилетия с тем, чтобы сравнить их со значениями испарения и стока за предыдущее время, относящееся к эпохе стационарного климата.

В качестве факторов, определяющих сток и испарение, в настоящей работе рассматривались годовые осадки и сумма среднемесячных температур воздуха за теплый период года.

Известно уравнение водного баланса речного бассейна для средних многолетних условий, может записано в виде

$$X = E + Y, \quad (2.1)$$

Где,  $X$ ,  $Y$ ,  $E$  – соответственно средние многолетние значения (нормы) годовых осадков, стока и испарения с поверхности бассейна. Все переменные в уравнении (2.1) определяются в мм слоя воды.

Так как далее всегда речь будет идти о средних многолетних значениях, то для краткости, эти полные наименования переменных в уравнении (2.1) будут опускаться, и эти переменные будут называться – осадки, сток, испарение.

Уравнение (2.1) может быть использовано для определения одного неизвестного члена уравнения при условии, что значения двух других элементов определены с надлежащей точностью.

В настоящей работе мы будем находиться в ситуации, когда осадки известны, испарение мы можем рассчитать по определенным методам, а сток будем находить как остаточный член из уравнения (2.1).

В работе использовались осадки с поправками на смачивание и ветровой недоучет. Осадки за эпоху стационарного климата (первый период) заимствовались из Справочника по климату СССР, а за последние десятилетия (второй период) из данных электронного ресурса [meteo.ru](http://meteo.ru) (ФГБУ «ВНИИГМИ–МЦД» Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – мировой центр данных).

Испарение определялось по методике, разработанной на кафедре инженерной гидрологии нашего университета. Содержание этой методики определяется следующими уравнениями [9,10]

$$E = E_0(1 - e^{-z}), \quad (2.2)$$

Где,  $z = \frac{x}{E_0} + \frac{1}{2} \left( \frac{x^2}{E_0^2} \right)$ .

$$E_0 = 16.8(0.8 + 0.011t_{\text{п}})(90 - 52e^{0.11(6-t_{\text{п}})}), \quad (2.3)$$

Где,  $E_0$  – испаряемость, т.е. максимально возможное испарение с предельно возможной увлажненной территории при данных метеоусловиях.

$$t_{\text{п}} = \frac{\sum t_i}{12}, \quad (2.4)$$

Где,  $\sum t_i$  – сумма среднемесячных значений температуры воздуха за теплый период года.

К теплому периоду года в настоящей работе относились месяцы с неотрицательной среднемесячной температурой воздуха. Деление на двенадцать здесь вызвано двумя причинами. Во-первых, для уменьшения температурной характеристики теплого периода, чтобы удобнее было обращаться с ней в уравнении (2.3). Во-вторых, деление  $\sum t_i$  именно на двенадцать, а не на какое-то другое число, позволяет в тех регионах, где все месяцы года имеют положительную температуру воздуха, считать температуру равной среднегодовой температуре [10].

### Глава 3 Результаты и анализ проведенных исследований

В проведенных исследованиях бассейн Дона делился на две части, которые условно назывались Верхний и Нижний Дон. Верхним Доном называлась часть его бассейна до станицы Казанская. Нижним Доном здесь называлась часть его бассейна от станицы Казанская до станицы Раздорская без бассейна реки Северский Донец. Исключение территории бассейна р. Северского Донца связано с тем, что основная часть его бассейна находится в Украине, а это исключает возможность получения необходимых данных об осадках и температуре воздуха за второй период. В таблице 3.1 приводятся данные о стоке с этих бассейнов за первый период.

Таблица 3.1 – Характеристика бассейна

Речной бассейн	F, км <sup>2</sup>	Q, м <sup>3</sup> /с	Y, мм
р. Дон – ст. Казанская	102000	332	103
р. Дон – ст. Раздорская	422000	852	
р. Северский Донец – г. Белая Калитва	98900	122	
Нижний Дон	221000	398	57
Весь Дон	323000	684	72

3.1 Изменение испарения и стока при заданных изменениях температуры воздуха ( $\Delta t$ ) и осадков ( $\Delta X$ ) с территории Верхнего Дона

Изменения температуры воздуха и осадков, мы предполагали, что изменения климата начались недавно, и поэтому величины  $\Delta t$  и  $\Delta X$  не могут быть большими. Было решено назначить их значения следующими:  $\Delta t = \pm 0.5$  °C и  $\Delta X = \pm 0.05X$ , где X – норма осадков за первый период.

В таблице 3.1.1 представлены данные по осадкам и температуре воздуха, определяемой по уравнению (3.5) на станциях, расположенных в пределах Верхнего Дона.

Таблица 3.1.1 – Исходные данные для территории Верхнего Дона

№	Станция	X, мм	t <sub>п</sub> , °C
1	Конь-Колодезь	574	7.8
2	Липецк	630	7.8
3	Калач	573	9.6
4	Тамбов	628	7.6
5	Росташи	541	8.0
6	Воронеж	672	8.0
7	Поныри	764	7.3
8	Казанская	517	8.9
Среднее		612	8.0

Используя средние значения X и t, приведенные в таблице 3.1.1, и применяя уравнения (2.2) – (2.4), мы получили изменения испарения с территории Верхнего Дона, данные о которых приведены в таблице 3.1.2 – 3.1.3.

Таблица 3.1.2 – Изменение испарения ( $\Delta E$ ), мм

Верхняя часть бассейна р. Дон (до 1960 г.)			
	$\bar{t}_n-0.5$	$\bar{t}_n$	$\bar{t}_n+0.5$
$0.95\bar{X}$	480	496	512
$\bar{X}$	488	506	522
$1.05\bar{X}$	497	515	531

Таблица 3.1.3 – Изменение испарения ( $\Delta E$ ), %

Верхняя часть бассейна р. Дон (до 1960 г.)			
	$\bar{t}_n-0.5$	$\bar{t}_n$	$\bar{t}_n+0.5$
$0.95\bar{X}$	95	98	101
$\bar{X}$	97	100	103
$1.05\bar{X}$	98	102	105

С помощью полученных данных по изменению испарения и уравнения (2.1) были оценены возможные изменения стока с территории Верхнего Дона (Табл. 3.1.4-3.1.5).

Таблица 3.1.4 – Изменение стока ( $\Delta Y$ ), мм

Верхняя часть бассейна р. Дон (до 1960 г.)			
	$\bar{t}_n-0.5$	$\bar{t}_n$	$\bar{t}_n+0.5$
$0.95\bar{X}$	102	85	69
$\bar{X}$	124	106	90
$1.05\bar{X}$	146	128	111

Таблица 3.1.5 – Изменение стока ( $\Delta Y$ ), %

Верхняя часть бассейна р. Дон (до 1960 г.)			
	$\bar{t}_n-0.5$	$\bar{t}_n$	$\bar{t}_n+0.5$
$0.95\bar{X}$	96	80	65
$\bar{X}$	116	100	85
$1.05\bar{X}$	137	120	105

Данные таблицы 3.1.3 показывают, что испарение может уменьшиться при неблагоприятных для него условиях (снижение температуры и снижение осадков) на 5 %, а при благоприятных условиях (повышение температуры и осадков) увеличиться на 5%. Таким образом, при заданных изменениях факторов, определяющих относительные изменения испарения, будут сравнительно небольшими.

Относительные изменения испарения стока при тех же изменениях температуры воздуха и осадков могут быть весьма значительными. Уменьшение стока при неблагоприятных условиях (снижение осадков и повышение температуры) составит 35%, а при благоприятных условиях (увеличение осадков и понижение температуры) увеличение стока может составить до 37 % от начальной нормы.

3.2 Изменение испарения и стока при заданных изменениях температуры воздуха ( $\Delta t$ ) и осадков ( $\Delta X$ ) с территории Нижнего Дона

Таблица 3.2.1 – Исходные данные для территории Нижнего Дона

№	Станция	X, мм	t <sub>п</sub> , °C
1	Гигант	563	10.1
2	Ремонтное	420	9.8
3	Цимлянск	510	9.8
4	Сальск	546	10.3
5	Целина	543	9.7
6	Раздорская	595	-
7	Нижний Чир	384	9.6
8	Серафимович	514	9.2
9	Миллерово	577	8.9
10	Фролово	502	9.0
11	Вешенская	541	9.1
	Среднее	518	9.6

Используя средние значения X и t (осадков и температуры воздуха), приведенные в таблице 3.2.1, и применяя уравнения (2.2) – (2.4), мы получили изменение испарения с территории Нижнего Дона, данные о которых приводятся в таблице 3.2.2 – 3.2.3.

Таблица 3.2.2 – Изменение испарения ( $\Delta E$ ), мм

Нижняя часть бассейна р. Дон (до 1960 г.)			
	$\bar{t}_п-0.5$	$\bar{t}_п$	$\bar{t}_п+0.5$
$0.95\bar{X}$	442	446	449
$\bar{X}$	461	465	468
$1.05\bar{X}$	479	483	487

Таблица 3.2.3 – Изменение испарения ( $\Delta E$ ), %

Нижняя часть бассейна р. Дон (до 1960 г.)			
	$\bar{t}_n-0.5$	$\bar{t}_n$	$\bar{t}_n+0.5$
$0.95\bar{X}$	95	96	97
$\bar{X}$	99	100	101
$1.05\bar{X}$	103	104	105

С помощью полученных данных по изменению испарения и уравнения (2.1) были оценены возможные изменения стока с территории Нижнего Дона (Табл. 3.2.4 – 3.2.5).

Таблица 3.2.4 – Изменение стока ( $\Delta Y$ ), мм

Нижняя часть бассейна р. Дон (до 1960 г.)			
	$\bar{t}_n-0.5$	$\bar{t}_n$	$\bar{t}_n+0.5$
$0.95\bar{X}$	50	46	43
$\bar{X}$	57	53	42
$1.05\bar{X}$	65	61	57

Таблица 3.2.5 – Изменение стока ( $\Delta Y$ ), %

Нижняя часть бассейна р. Дон (до 1960 г.)			
	$\bar{t}_n-0.5$	$\bar{t}_n$	$\bar{t}_n+0.5$
$0.95\bar{X}$	94	87	81
$\bar{X}$	108	100	93
$1.05\bar{X}$	123	114	107

Данные таблицы 3.2.3 показывают, что испарение может уменьшиться при неблагоприятных для него условиях (снижение температуры и снижение осадков) на 5 %, а при благоприятных условиях (повышение температуры и осадков) увеличиться на 5%. Таким образом, при заданных изменениях факторов, определяющих относительные изменения испарения, будут сравнительно небольшими.

Относительные изменения испарения стока при тех же изменениях температуры воздуха и осадков могут быть весьма значительными. Уменьшение стока при неблагоприятных условиях (снижение осадков и повышение температуры) составит 19%, а при благоприятных условиях (увеличение осадков и понижение температуры) увеличение стока может составить до 26 % от начальной нормы.

### 3.3 Сравнение гидрометеорологических величин

После того, как рассчитаны все гидрометеорологические величины, сравним теперь фактические (измеренные) значения стока (Табл. 3.1) с рассчитанными в настоящей работе (Табл. 3.3.1).

Таблица 3.3.1 – Измеренные ( $Y_{и}$ ) и рассчитанные ( $Y_{р}$ ) значения стока, мм

Часть бассейна	$Y_{и}$ , мм	$Y_{р}$ , мм	$\delta$ , %
Верхний Дон	103	106	3
Нижний Дон	57	53	7
Весь Дон	67	70	4

Данные таблицы 3.3.1 показывают, что используемая методика оценок стока в бассейне р. Дон достаточно удовлетворительна, то есть дает расчетные значения стока, которые очень близки к фактическим значениям стока, относительная погрешность ( $\delta$ ) составляет около 3-7%.

### 3.4 Оценка изменений стока р. Дон под влиянием изменений климата

В предыдущем разделе была проведена оценка изменений испарения и стока с бассейна Верхнего и Нижнего Дона при заданных (небольших) изменениях величин  $X$  и  $t$  (осадков и температуры воздуха). В настоящем разделе попытаемся определить сток как с частей бассейна р. Дон, так и со всего его бассейна без бассейна р. Северский Донец за тридцатилетний период с 1986 г. по 2015 г., в течение которого происходили заметные изменения климата. Необходимые расчеты, как и в предыдущих разделах проводились по

уравнениям (2.1) – (2.4). Необходимые исходные данные заимствовались из электронного ресурса [meteo.ru](http://meteo.ru) (ФГБУ «ВНИИГМИ–МЦД» Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – мировой центр данных). Данные по  $X$  и  $t$  (осадкам и температуре воздуха), которые удалось обнаружить в этом ресурсе по территории Верхнего Дона в таблице 3.4.1, а по территории Нижнего Дона в таблице 3.4.2

Таблица 3.4.1 – Исходные данные по территории бассейна Верхнего Дона

№	Станция	$X$ , мм	$t_n$ , °C
1	Конь-Колодезь	-	8.6
2	Валуйки	612	9.2
3	Калач	-	9.1
4	Тамбов	-	8.3
5	Росташи	524	8.5
6	Воронеж	-	8.8
7	Поныри	652	7.9
8	Урюпинск	494	9.1
9	Богородицкое-Фенино	637	8.4
10	Курск	681	8,4
Среднее		600	8.6

Таблица 3.4.2 – Исходные данные по территории бассейна Нижнего Дона

№	Станция	$X$ , мм	$t_n$ , °C
1	Гигант	582	11.1
2	Ремонтное	467	10.8
3	Цимлянск	-	10.6
4	Фролово	474	9.6
5	Ростов-на-Дону	-	10.6
6	Элиста	450	10.9
Среднее		493	10.6

По средним значениям  $t$  и  $X$  (температуре воздуха и осадкам), приведенным в таблице 3.4.1 и таблице 3.4.2, были определены значения испарения и стока с бассейнов как Верхнего Дона, так и Нижнего Дона.

Таблица 3.4.3 – Испарение и сток по частям бассейна и по всему бассейну р. Дон

Часть бассейна	$E$ , мм	$Y$ , мм	$X$ , мм
Верхний Дон	508	92	600
Нижний Дон	452	41	493
Весь Дон	470	57	527

Значения  $E$  (испарение),  $Y$  (сток),  $X$  (осадки) в последней строке табл. 3.4.3 получены как средневзвешенные с учетом площадей бассейнов.

В табл. 3.4.4 и 3.4.5 приводится сравнение за первый и второй периоды, рассчитанных по методике, которая была разработана на кафедре инженерной гидрологии, значений испарения, стока и их определяющих факторов.

Таблица 3.4.4 – Значение температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) и осадков (мм) за первый (до 1960 г.) и второй (1986-2015 гг.) периоды

Часть бассейна	$t_{\text{до1960г.}}$	$t_{1986-2015\text{гг.}}$	$\Delta t$	$X_{\text{до1960г.}}$	$X_{1986-2015\text{гг.}}$	$\Delta X$
Верхний Дон	8.0	8.6	0.6	612	600	-12
Нижний Дон	9.6	10.6	1.0	518	493	-25

Таблица 3.4.5 – Значения испарения и стока за первый (до 1960 г.) и второй (1986-2015 гг.) периоды, мм

Часть бассейна	$E_{\text{до1960г.}}$	$E_{1986-2015\text{гг.}}$	$\Delta E$	$Y_{\text{до1960г.}}$	$Y_{1986-2015\text{гг.}}$	$\Delta Y$	$\delta Y$ , %
Верхний Дон	506	508	2	106	92	-14	-14
Нижний Дон	465	452	-13	53	41	-12	-21
Весь Дон	478	470	-8	70	57	-13	-18

Эти данные говорят о том, что средние многолетние значения стока за период 1986-2015 гг. заметно снизились по сравнению с эпохой стационарного климата.

## Заключение

В настоящей работе были рассчитаны оценки изменения испарения с поверхности суши и речного стока с бассейна р. Дон, которые могли произойти под влиянием изменений климата в последние десятилетия.

Рассматривались два периода: 1936-1965 гг. и 1986-2015 гг., первый из которых относится к стационарному периоду климата, второй – ко времени интенсивных изменений климата. Оценки испарения и речного стока проводились для верхней и нижней части по данным о температуре и осадкам примерно по 10 станциям с каждой части. Нормы испарения определялись по уравнению связи, затем определялись нормы стока для каждой из частей бассейна р. Дона, как разность осадков и испарения. Для оценки испарения использовалась методика, разработанная на кафедре инженерной гидрологии нашего университета.

Исходные данные, которые так необходимы для проведения расчетов были нормы годовых осадков (с поправками на смачивание и ветровой недоучёт) и нормы месячной температуры за теплый период года.

При сравнение исходных данных за два периода оказалось, что температура теплого периода повысилась на Верхней части бассейна р. Дон на 0.6 °С, а на Нижней части увеличилась на 1.0 °С. Сравнивая два периода по нормам годовых осадков, заметим тенденцию убывания.

В проведенных исследованиях бассейн Дона делился на две части, которые условно назывались Верхний и Нижний Дон. Для этих частей изменение осадков составило соответственно –12 мм и –25 мм. Изменение испарение составило 2 мм и –13, а со всего бассейна Дона составило –8 мм.

Испарение может уменьшиться при неблагоприятных для него условиях (снижение температуры и снижение осадков), а при благоприятных условиях (повышение температуры и осадков) увеличиться. Среднее значение испарения

использовалось двух периодах стационарном и нестационарном, для удобства оценки данной величины. Она определяется как разность испарения и стока по каждому периоду: до 1960 г. и 1986-2015 гг.

Средние многолетние значения стока за период 1986-2015 гг. заметно снизились по сравнению с эпохой стационарного климата.

Анализируя полученные результаты, можно прийти к выводу, что даже, незначительные изменения норм осадков ( $\pm 5\%$ ) и температуры ( $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ) могут приводить к достаточно большим изменениям норм речного стока.

## Список используемых источников

1. Костин С.И. Климатология / С.И. Костин, Т.В. Покровская. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1961. – 485 с.
2. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2015 год. – Москва, 2016. – 68 с.
3. Основные гидрологические характеристики водных объектов бассейна реки Дон / Под редакцией В.Ю. Георгиевского. – Санкт-Петербург : Свое издательство, 2020. – 262 с.
4. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.7.Донской район / Под ред. М.С. Протасьева. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1973. –459 с.
5. Лурье П.М., Панов В.Д. Река Дон: Гидрография и режим стока. Ростов-на-Дону : Донской издательский дом, 2018. –592 с.
6. Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние: монография / Р. Г. Джамалов, М. Б. Киреева, А. Е. Косолапов, Н. Л. Фролова; Федеральное агентство научных организаций, Институт водных проблем РАН и др. - Москва :ГЕОС, 2017. - 204 с.
7. Подземный сток на территории СССР/ Под ред. Б.И. Куделина. М.: Изд-во МГУ, 1966.- 303 с.
8. Свод правил. СП 33-101-2003. – 2004. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 73 с
9. Постников А.Н. К оценке среднемноголетних значений суммарного испарения с поверхности суши на основе уравнений связи // Труды РГГМУ. – 1999.– Вып. 123, с.141 – 152.
10. Постников А.Н. Формулы для расчета среднего годового испарения с поверхности суши и радиационного баланса увлажненной поверхности. // Проблемы современной гидрологии. Сборник научных трудов гидрологического факультета РГГМУ, – 2004.– с.143 – 153.