



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 среднего многолетнего
испарения и речного стока под
влиянием изменения климата в
Центральном федеральном
округе России**

Исполнитель **Лобанов Константин Эдуардович**
(фамилия, имя, отчество)

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

Постников Александр Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

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

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«11» 06 2023г.

Санкт-Петербург
2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1 Физико-географическое описание Центрального федерального округа	4
1.1 Рельеф	4
1.2 Геологическое строение	8
1.3 Климат	14
1.4 Почвы	15
1.5 Растительность	18
2 Методы расчета среднегогодового испарения с поверхности суши	22
2.1 Способы определения испарения	22
2.2 Уравнения связи	23
3 Расчет и анализ составляющих водного баланса Центрального федерального округа	35
3.1 Исходные данные	35
3.2 Нормы годовых осадков и температуры воздуха за теплый период	37
3.3 Нормы испарения и стока	39
3.4 Вклады в изменения норм испарения и стока	41
Заключение	45
Список использованных источников	46

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследований в данной работе был выбран Центральный федеральный округ Российской Федерации. Этот округ расположен в Европейской части России и занимает более 650 тыс. км². Округ состоит из 17 областей и города федерального значения Москва. На территории округа расположены крупные промышленные центры, проживает более 40 млн человек.

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

Можно сказать, что изменение климата, по сути, есть изменение среднесезонных значений (норм) гидрометеорологических элементов. Опираясь на связь этих элементов (осадки, температура воздуха, испарение, сток) в уравнении водного баланса, в работе сделана оценка изменения нормы речного стока при фактическом изменении климата за недавно прошедшие года. Достижение данной цели имеет не только научный, но и практический интерес, поскольку речной сток имеет огромное значение для народного хозяйства страны.

Задачами же данной работы являлись:

- а) изучение природных условий территории исследования;
- б) исследование методов определения нормы годового испарения;
- в) выбор подходящего метода;
- г) сбор необходимых исходных данных, их обработка;
- д) расчет и анализ составляющих водного баланса;
- е) расчет и анализ вкладов в изменения норм испарения и стока;
- ж) представление результатов проведенного исследования в краткой форме.

1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

1.1 Рельеф

Поверхность в общем равнинной территории округа представляет собой чередование низменных равнин и возвышенностей с колебанием абсолютных отметок в пределах 100–300 м. На формирование рельефа большое влияние оказало геологическое строение и тектонические особенности Восточно-Европейской платформы. Основная часть рассматриваемой территории еще в мезозое вступила в стадию континентального развития, в период которой сформировались крупные элементы рельефа. В западной и юго-западной частях территории, где на поверхность выступают плотные карбонатные породы каменноугольной и девонской систем, простираются Валдайская, Смоленско-Московская, Среднерусская возвышенности, а за юго-восточной границей территории – Приволжская возвышенность. В северной и восточной частях округа, сложенных более рыхлыми породами перми и мезозоя, располагаются обширные низменности: Верхневолжская, Ветлужско-Унжинская, Мещерская, Окско-Донская. В эту общую схему рельефа, сложившуюся в доледниковое время, большое разнообразие внесли оледенения четвертичного периода, в значительной степени, определившие современные формы поверхности. Описываемая территория не менее четырех раз перекрывалась ледниками, но на формирование рельефа в основном оказала влияние деятельность трех последних ледниковых покровов: днепровского, московского и валдайского. Границы оледенений во многих местах чётко прослеживаются в рельефе. Формы поверхности, возникающие в результате деятельности ледников, в последующее время в разной степени были преобразованы воздействием флювиальных и эрозионных процессов.

Наиболее сильное воздействие денудационные процессы оказали на поверхность внеледниковой области, в результате чего Среднерусская и Приволжская возвышенности характеризуются более зрелыми эрозионными формами, чем северная часть округа.

В соответствии с морфогенетическим принципом геоморфологического районирования [5] рассматриваемая территория относится к трем провинциям:

- а) ледниковых холмистых и плоских равнин;
- б) водно-ледниковых и аллювиальных равнин;
- в) сильно о расчлененных эрозией возвышенных равнин.

Провинция ледниковых холмистых и плоских равнин охватывает всю северную часть округа. Северная часть провинции характеризуется хорошо сохранившимися эрозионными формами, оставленными валдайским ледником, на остальной её части ледниковые формы значительно изменены процессами денудации. Для севера (бассейн реки Мологи) типично наличие моренных возвышенностей с песчаными холмами и грядами, большое число озер и слабо развитая эрозионная сеть.

Крайний запад территории занимает Валдайская возвышенность – один из наиболее приподнятых участков территории с отметками 200–300 м абс. Остальная часть поверхности представляет собой мелкохолмистую моренную равнину с многочисленными плоскими, часто замкнутыми понижениями, занятыми озёрами и болотами. Наиболее крупные озера приурочены к понижениям доледникового рельефа.

Северо-восточная и южная части провинции характеризуются развитием слабохолмистых равнин с широкими, часто заболоченными долинами и низинами. По ее южной окраине протягиваются Гжатско-Можайская, Клинско-Дмитровская гряды, Волоколамская, Смоленско-Московская возвышенность и др. Наиболее значительная из них, Смоленско-Московская возвышенность, представляет собой, чередование крупнохолмистых гряд и плоских, слабовсхолмленных участков с отметками 200–220 м (наивысшие до 290 м). Холмы с расплывчатыми очертаниями незаметно переходят в разделяющие их

ложбины. Речная сеть возвышенности более развита чем на Валдайской, реки протекают в хорошо оформленных долинах с двумя или тремя надпойменными террасами. Склоны долин изрезаны оврагами и балками. Клинско-Дмитровская гряда отличается асимметричностью склонов, круто падающих на север к Верхне-волжской низине и полого снижающихся к югу [13]. Наиболее расчлененным, увалистым, а местами холмисто-эрозионным рельефом отличается восточная часть гряды. Продолжением Смоленско-Московской возвышенности к северо-востоку является Галичская возвышенность, пологие склоны которой образуют слабонаклонные волнистые равнины с высотами до 200–210 м. На юго-восточных склонах возвышенности прослеживаются границы оледенения в виде прерывистой полосы холмов.

Широкое распространение имеют типичные для провинции слабохолмистые междуречные равнины, сложенные мореной, перекрытые безвалунным суглинком и местами осложненные грядами холмов. Такие равнины характерны для Ржевско-Старицкого Поволжья и водоразделов, рек Тверцы и Мологи. Наряду с грядовыми возвышенностями и моренными равнинами наиболее характерной формой рельефа провинции являются обширные низменные равнины с ложбинно-зандровыми формами: Рыбинская, Ярославская, Костромская, Волго-Шошинская, Ветлужско-Унжинская и др. Большая Волго-Шошинской низины затоплена водами Иваньковского водохранилища. Плоский характер рельефа низин обусловлен выравниванием форм доледникового рельефа ледниковыми отложениями, мощность которых достигает 70–80 м. Плоские песчаные пространства плохо дренируются вследствие неглубокого вреза долин и близкого залегания к поверхности моренного-суглинка.

Костромская низина, наиболее плоская и низкая (отметки 80–110 м), смыкается с Ярославской низиной и вместе с котловиной озера Неро образует обширную низменность. Долины Волги и ее притоков на этом участке врезаны очень слабо, а широкие заболоченные надпойменные террасы рек сливаются с поверхностью зандровой равнины.

К югу от Костромской низины расположена Ветлужско-Унжинская низменность. Талые воды московской стадии оледенения отложили здесь обширные песчаные зандровые поля. Поверхность равнины преимущественно увалистая.

К провинции водно-ледниковых и аллювиальных равнин на рассматриваемой территории относится Окско-Донская низменность, ограниченная с запада Среднерусской, с востока Приволжской и с севера Смоленско-Московской возвышенностями. Северная часть Окско-Донской низменности получила название Мещерская низина.

Для Окско-Донской низменности характерны обширные плоские поверхности с отметками 150–180 м, а на севере до 110–125 м. Черты современного рельефа низменности определились еще в дочетвертичное время. Этот район относится к области надвига днепровского ледника, поэтому поверхностными отложениями, покрывающими более древние породы, служат морены, флювиогляциальные пески и супеси, а также продукты их перемывки. Мощность четвертичной толщи местами достигает 100 м, чаще же она не превышает 5–10 м. Талые воды отступившего ледника образовали широкие песчаные полосы вдоль долин рек Цны, Пары, Прони, Мокши. В период таяния Московского ледника образовалось обширное зандровое поле в пределах Мещерской низины. Равнинные пространства Окско-Донской низменности слабо расчленены долинно-балочной сетью. Наибольшим расчленением отличаются левобережье реки Цны и верхняя часть бассейна реки Мокши.

В северной части низменности широко распространены заболоченные бессточные понижения. На песчаных равнинах встречается бугристый рельеф.

К провинции сильно расчлененных возвышенных равнин относятся Среднерусская и Калачская возвышенности. Среднерусская возвышенность представляет собой волнистую равнину, расчлененную глубокими долинами рек, балок и ветвящихся оврагов. Высоты на водоразделах колеблются преимущественно в пределах 220–250 м и лишь в бассейне реки Зуши увеличиваются до 250–300 м.

Современные формы рельефа определены в основном густотой и глубиной эрозионной сети. Своеобразие рельефа заключается в наложении более молодого расчленения на древние эрозионные формы. Водоразделы, как правило, утратили исходный плоский характер и приобрели форму куполов из-за смыкания склонов долин и овражно-балочной сети. Увалистые водоразделы сохранились лишь в северной части возвышенности. Значительная часть поверхности занята оврагами, частично или полностью задернованными. Овраги длиной от сотен метров до нескольких километров имеют глубину 8–25 м. Густота овражной сети в центральной части возвышенности в среднем 0,2–0,4 км/км², а интенсивность роста в настоящее время достигает 1–1,5 м в год.

Между рекой Дон и участком нижнего течения его притока – реки Хопра – находится Калачская возвышенность, в целом представляющая собой плато высотой в среднем от 200 до 230 м, расчлененное глубокими долинами рек, балками и оврагами [12]. В геологическом и морфологическом отношении Калачская возвышенность является продолжением на восток Среднерусской возвышенности, от которой ее отделяет широкая долина реки Дон. Восточной склон Калачской возвышенности крутым высоким уступом (до 100–120 м) обрывается в долину реки Хопра; северные же, западные и южные ее склоны – пологие, постепенно переходящие в высокие надпойменные террасы Дона (на западе и юге) и поверхность Окско-Донской низменности (на севере). Абсолютные высоты возвышенности на западе в верховьях рек Осереды и Толучеевки составляют 227–230 м, на востоке близ долины реки Хопра доходят до 245 м.

1.2 Геологическое строение

Рассматриваемая территория расположена в центральной части кристаллического фундамента Русской платформы, в основном в пределах Московской впадины, заполненной толщей осадочных пород мощностью

1500–3000 м. Поверхность кристаллических пород ограничена на юге выступами Воронежской и Волго-Уральской антиклиз и повышается на северо-запад в сторону Балтийского щита. Поверхность докембрийского фундамента осложнена множеством структур второго порядка в виде валов и прогибов.

Кристаллические породы не выходят непосредственно на поверхность и залегают на глубинах 2500–3000 м в Ветлужско-Унжинском районе, 1500–2000 м в восточной части территории и 500–1500 м на юго-западе в районе Среднерусской возвышенности. Осадочная толща представлена системами нижнего палеозоя, девона, карбона, перми и мезо-кайнозоя.

Наиболее древние отложения верхнего девона, выходящие на дневную поверхность в юго-западной части округа (бассейн Верхней Оки), представлены известняками, доломитами, мергелями с прослоями ангидрита и гипса. Породы каменноугольной системы широко распространены по всей западной окраине территории от бассейна реки Мологи на севере до притоков верхней Оки (реки Упа, Жиздра) на юге, а также в восточной части округа полосой, вытянутой в меридиональном направлении по линии г. Ковров – г. Шацк. Отложения карбона представлены преимущественно известняками: в районе Смоленско-Московской гряды песками и глинами с прослоями известняка, в Московско-Окском междуречье – известняками и доломитами, в осевой части Окско-Цнинского вала – пестрыми глинами, мергелями и известняками, в верховьях Среднерусской возвышенности – песками и глинами с прослоями угля и известняков.

Пермские отложения встречаются на севере округа, сменив погружающиеся к востоку каменноугольные (в бассейне реки Мологи), и занимают обширное пространство в восточной части округа (бассейны нижнего течения реки Оки). В бассейне реки Мологи пермские отложения представлены пестроцветными глинами с прослоями песчаников, в верховьях рек Костромы и Унжи на поверхность выступают доломиты с гипсом и прослоями глин, а в бассейне рек Оки и Волги восточнее 40° в. д. наибольшее распространение имеют доломиты и известняки с прослоями глин, мергелей и гипса.

Отложения нижнего триаса в наибольшей степени распространены в бассейне реки Ветлуги и восточнее Рыбинского водохранилища, включая бассейн реки Костромы; на дневную поверхность выходят пестроцветные пески, песчаники, глины, алевролиты с прослоями горючих сланцев и фосфоритов. Юрские отложения встречаются вдоль течения реки Волги выше Рыбинского водохранилища и вскрываются долиной Волги до впадения реки Унжи, а также пятнами выходят на поверхность в восточной части округа. Юрские отложения представлены преимущественно глинами, в меньшей степени песками и алевролитами.

Отложения нижнего и среднего мела выходят на поверхность обширных пространств юго-востока территории в бассейнах рек Цны и Мокши, а также встречаются в междуречье Костромы и Унжи, в бассейне реки Клязьмы и в верховьях реки Оки. Меловые отложения в основном представлены песками, песчаниками и глинами. Отложения мезозойской системы (юра и мел) встречаются в сложном пространственном комплексе (в междуречье Москвы и Оки и на крайнем северо-востоке Среднерусской возвышенности). Отложения неогена имеют незначительное распространение и выделены только в юго-восточной части округа, в верховьях реки Цны.

По среднему Дону к югу от г. Павловск (Воронежская область) граниты выходят на поверхность небольшими пятнами по берегам реки. На этом участке Дон пересекает восточный конец подземного поднятия горста. Отсюда поверхность кристаллического фундамента понижается во всех направлениях более полого на север и более круто на восток. В верховьях Дона она лежит на глубине около 1000 м.

Девонские отложения в виде мощной толщи (свыше 100 м) разнообразных известняков, глинистых сланцев, песчаников прикрывают кристаллические породы на значительной площади северо-западной части бассейна Дона (к северу от параллели г. Богучара) и имеют общий слабый наклон к северу, в сторону Подмосковной котловины

В верховьях Дона девонские отложения залегают под каменноугольными породами разнообразного литологического состава, также имеющими наклон к северу.

В северной части бассейна Дона (к северу от параллели г. Воронежа) девонские и каменноугольные отложения прикрыты юрскими отложениями, представленными внизу песчано-глинистой толщей, вверху – темными вязкими глинами.

Наиболее распространение в Донском районе получили отложения меловой системы, всюду выходящие на поверхность по склонам речных долин, балок и оврагов. Они представлены как нижним, так и верхними отделами. Литологически в нижнем их отделе преобладают пески с прослоями глин общей мощностью до 40–60 м. Верхний же отдел образован главным образом писчим мелом и мергелями, относимыми к турону и нижнему сенону, и имеет мощность в несколько десятков метров (до 70 м и больше). Писчий мел и мергель подстилаются песками сеномана.

Коренные породы обычно выходят на поверхность по берегам рек, а в междуречьях почти повсеместно перекрыты четвертичным чехлом. В четвертичный период большая часть территории округа не менее четырех раз перекрывалась ледниками, о чем свидетельствуют четыре самостоятельных горизонта морен, разделенных межледниковыми отложениями. Внеледниковая область испытывала воздействие ледниковых вод. Ледник и его воды оставили сложный комплекс отложений мощностью в десятки (реже до 100 и более) метров, представленных мореной, ленточными глинами, флювиогляциальными песками, а также покровными суглинками.

Пространственное распределение ледниковых отложений как по мощности, так и по составу имеет весьма пестрый и разнообразный характер. На северо-западе бассейна в верховьях Волги и ее левобережных притоков наибольшее распространение имеют валунные суглинки, а в пределах холмистого ландшафта – суглинки с прослоями супесей и песков; в низинах преобладают озерные и флювиогляциальные пески и глины; большие площади

занимают древние аллювиальные пески. Толща ледниковых и послеледниковых отложений составляет в среднем 50–60 м.

Поверхность в восточной части округа (Ветлужско-Унжинская низменность) сложена преимущественно флювиогляциальными песками мощностью 5–7 м, иногда до 10–15 м, под которыми залегает прерывистый чехол валунного суглинка.

В пределах Смоленско-Московской возвышенности три горизонта морены и водноледниковые отложения перекрыты покровными суглинками мощностью 1–6 м. Для Мещерской низины наиболее характерны флювиогляциальные и древнеаллювиальные пески и глины, а в понижениях озерные пески. Большую площадь занимают мощные торфяники. На более возвышенных участках центра территории (Юрьев-польская, Теплостанская возвышенности, Москворецко-Окское междуречье) развиты лёссовидные суглинки мощностью 2–4 м, подстилаемые мореной и песками.

В пределах Среднерусской возвышенности на водоразделах и пологих склонах залегают безвалунные суглинки мощностью 3–6 м, подстилаемые мореной, а в южных частях склонов песками.

В южной части Окско-Донской низменности поверхность коренных пород перекрыта мощной толщей водно-ледниковых и древнеаллювиальных песков и супесей, реже глин. В Верхней части бассейна реки Цны встречаются покровные суглинки. В северной части низменности четвертичные отложения представлены днепровской мореной мощностью 6–8 м, перекрытой лёссовидными суглинками (мощностью 2–3 м) и местами маломощным покровом флювиогляциальных песков.

Наличие обширных площадей, сложенных карбонатными породами, местами выходящими на поверхность или прикрытыми маломощными водопроницаемыми отложениями, определяет развитие карстовых форм на территории округа, главным образом в виде воронок, провалов, западин, карстовых озер и трещин.

В северной части округа распространены в основном карст известняков карбона и гипсовый карст пермских отложений. Карст выражен воронками, оврагами, сухими долинами, подземными реками. В пределах Валдайской возвышенности в районе г. Селижарово вскрыты подземные каналы и пустоты. Многие озера в окрестностях озера Селигер карстового происхождения, на поверхности водораздельных склонов и на дне озерных котловин нередко встречаются провальные воронки.

В юго-западной части округа в пределах Среднерусской возвышенности карстовые процессы распространены в известняках девона, а также нижнего и среднего карбона (севернее г. Тулы). Основными формами здесь являются воронки в древних балках и долинах, диаметром 5–8 м, глубиной 1,5–29,5 м. На отдельных участках воронки при смыкании образуют западины длиной до 60 м. Карстовые формы встречаются чаще на участках, где карстующиеся породы залегают на некоторой глубине.

Южнее г. Тулы карстовые явления широко развиты в пределах распространения упинских известняков нижнего карбона. Здесь встречаются провальные воронки, карстовые озера, повышенная трещиноватость пород. Влияние карстовых явлений прослеживается в режиме стока рек на правом берегу Оки. На малых реках в бассейнах Цны, Зуши и других рек при строительстве запруд и плотин нередко происходит полная потеря воды из водохранилищ. В режиме стока рек Зуши и Цны прослеживается регулирующее влияние подземных емкостей, образованных карстующимися породами.

В восточной части округа карст приурочен в основном к известнякам среднего карбона. Проявление древнего погребенного карста и его поверхностные формы встречаются в окрестностях г. Москвы в виде воронок, карстовых оврагов и исчезающих речек. Значительное развитие имеют карстовые формы, образование которых связано с выщелачиванием карбонатных и гипсовых толщ карбона и перми в бассейне нижней Клязьмы, а также в междуречье Оки и Клязьмы. В закарстованных бассейнах мелкие реки в значительной степени теряют сток, тогда как более крупные, прорезая

водоносные горизонты, питаемые карстовыми водами, получают дополнительное подземное питание.

Влияние карста на режим стока в основном проявляется в уменьшении поверхностного стока и переводе его в подземный. Значительное подземное питание получают река Зуша и ее притоки из источников девонского водоносного горизонта, водообильность которого в немалой степени связана с карстовыми процессами.

1.3 Климат

Территория Центрального федерального округа расположена в зоне умеренно-континентального климата с холодной зимой и умеренно-теплым летом. Континентальность климата увеличивается с северо-запада на юго-восток. Основные климатические характеристики и их изменение по территории округа определяются влиянием общих и местных факторов: солнечной радиации, циркуляции атмосферы, подстилающей поверхности. По географическому положению округ находится под воздействием воздушных масс Атлантики, Арктического бассейна, а также масс, сформировавшихся над территорией Европы. В конце лета – начале осени, нередко во второй половине зимы и весной преобладает западный тип атмосферной циркуляции, сопровождающийся обычно активной циклонической деятельностью, значительными осадками, положительными аномалиями температуры воздуха зимой и отрицательными летом. Западный тип атмосферной циркуляции характеризуется значительной устойчивостью и нередко, сохраняется на протяжении до двух месяцев. На востоке и юго-востоке территории циклогенез менее активен.

С октября по май в результате воздействия сибирского максимума западная циркуляция нередко сменяется восточной, что сопровождается малооблачной погодой, большими отрицательными аномалиями температуры

воздуха зимой и положительными летом. Восточный тип циркуляции более вероятен и активен в юго-восточной части территории. Менее вероятна в данном районе меридиональная циркуляция, которая связана с мощными арктическими вторжениями воздушных масс и сопровождается резким понижением температуры воздуха.

1.4 Почвы

Почвенный покров Центрального федерального округа разнообразен по составу. Наряду с широтной закономерностью почвенных зон – подзолистой в пределах лесной зоны и черноземной в южной части лесостепной – территория характеризуется мелкоконтурным мозаичным характером почвенных сочетаний, а на отдельных участках отличается микрокомплексностью.

Наиболее распространенными являются дерновоподзолистые почвы, представленные всеми видами по степени оподзоленности. Развитие имеют подзолисто-болотные и болотные почвы. Для южной и центральной части округа характерны оподзоленные черноземы, серые лесные почвы, на юго-востоке встречаются типичные черноземы.

Дерново-подзолистые почвы развиты на ледниковых, водно-ледниковых и древнеаллювиальных отложениях, причем в их распространении по степени оподзоленности имеются определенные закономерности: на плоских элементах рельефа складываются условия для наибольшей оподзоленности, на склонах обычно развиваются дерново-средне- и слабоподзолистые почвы. Слабоподзолистые почвы, кроме того, приурочены к легким породам (пескам и супесям) или формируются на слабокарбонатной морене.

По механическому составу дерново-подзолистые почвы очень разнообразны и представлены песчаными, супесчаными, суглинистыми и глинистыми разновидностями. С дерново-подзолистыми сочетаются болотные и торфяно-болотные почвы, занимающие все отрицательные формы рельефа, а

также развитые на плоских водоразделах, сложенных, слабОВОдопроницаемыми породами.

В районах распространения лёссовидных суглинков формируются серые лесные почвы с различной степенью оподзоленности. В северной части округа преобладают легко- и среднесуглинистые почвы. Для болотных почв наиболее характерен тяжелосуглинистый и глинистый состав.

В северо-восточной части округа наибольшее развитие имеют дерново-подзолистые почвы с различным механическим составом. В бассейнах левобережных притоков Волги ниже Рыбинского водохранилища, включая бассейн реки Костромы, преобладают глинистые или суглинистые почвы, а в бассейнах рек Унжи и Ветлуги – песчаные и супесчаные, что не исключает сложных комплексов сочетания различных по механическому составу почв в бассейнах малых рек. На пониженных участках, а нередко и на плоских водоразделах встречаются торфяноболотные почвы.

Для Верхневолжской низменности характерны дерново-среднеподзолистые почвы, относительно небольшие площади занимают дерново-слабоподзолистые почвы. В Яхромско-Дубнинской низине распространены большие массивы перегнойно-торфяно-глеевых почв, а в котловине озера Неро – аллювиальные почвы. По механическому составу преобладают суглинистые и супесчаные почвы, подстилаемые суглинками и мореной. В пределах Смоленско-Московской возвышенности и Московско-Окского междуречья наибольшее развитие имеют дерново-подзолистые почвы на тяжелосуглинистых и глинистых покровных отложениях. Почвенный покров участков, сложенных мореной, имеет характер комплексных сочетаний дерново-подзолистых, а в понижениях – подзолистоболотных почв. Дерново-слабоподзолистые почвы приурочены к пескам и супесям на зандровых равнинах и в древних ложбинах стока. Распахиваемые участки дерново-подзолистых почв на покровных суглинках легко подвергаются эрозии, особенно на склонах с большими уклонами.

Для центральной части бассейна реки Клязьмы и Мещерской низины характерны средне- и слабо- подзолистые почвы в сочетании с болотными и полуболотными. На левобережье реки Клязьмы распространены также серые лесные почвы, а луговые поймы рек заняты аллювиальными дерновыми почвами, местами заболоченными. Механический состав почво-грунтов отличается значительной пестротой. В Мещерской низине преобладают песчаные почвы, в верхней части левобережного бассейна реки Клязьмы – тяжелосуглинистые и глинистые. Значительное место в Мещерской низине занимают болотные и полуболотные почвы.

На юго-западе округа в пределах Среднерусской возвышенности распространены суглинистые дерново-подзолистые, светло-серые и серые оподзоленные лесные почвы, на юге – оподзоленные и выщелоченные черноземы. На левобережной части бассейна реки Оки основной фон составляют средне- и легкосуглинистые почвы, а на правобережье – глинистые и тяжелосуглинистые. Только в верховьях реки Угры и в бассейне реки Жиздры встречаются супесчаные и песчаные массивы.

На юго-востоке округа в пределах Среднерусской возвышенности почвенный покров представлен главным образом оподзоленными, выщелоченными и типичными среднегумусными и мощными черноземами глинистого и тяжелосуглинистого механического состава. Указанные подтипы последовательного сменяют друг друга по мере движения с севера на юг. Наряду с черноземами встречаются темно-серые и серые лесные почвы, сформировавшиеся под широколиственными лесами. Почвообразующими породами являются преимущественно карбонатные лессовидные суглинки и глины.

Основной фон почвенного покрова Окско-Донской низменности представлен типичными тучными мощными черноземами, которые на пологих склонах водоразделов, слаборасчлененных балками, часто залегают в комплексе с солонцами и солонцеватыми почвами, которые приурочены к небольшим понижениям верховий балок. Их формирование связано с близким залеганием

засоленных древних делювиальных суглинков и выклиниванием грунтовых вод, вносящих в почву легкорастворимые соли и гипс. Почвообразующие породы делювиальными и элювиальными глинистыми отложениями, местами щебневатыми и хрящеватыми элювиальными наносами. В долинах рек распространены аллювиальные наносы в виде крупнозернистых песков или иловато-глинистых отложений.

Водораздел Дона и Хопра сильно расчленен оврагами, балками и речными долинами. Поэтому площадь смытых почв здесь значительна. Почвообразующие породы представлены желто-бурыми лессовидными и красно-бурыми тяжелыми суглинками и глинами, а в долинах рек аллювиальными песками. Основу почвенного покрова составляют обыкновенные среднегумусные среднеспособные черноземы.

1.5 Растительность

Большая часть рассматриваемой территории расположена в лесной и лесостепной зоне. Наибольшее распространение имеют еловые, а в верховьях рек Унжи, Межи и Ветлуги – елово-пихтовые леса. К подзоне южной тайги относится северная часть территории, граница которой протягивается примерно от 57° с. ш. на западе до 56° с. ш. на востоке. Нередко встречаются елово-сосновые и елово-березовые леса, а на супесчаных и заболоченных почвах – сосновые. Наиболее плоские переувлажненные участки рельефа заняты осиновыми лесами. Подзона тайги сменяется подзоной смешанных лесов, граница которой с подзоной широколиственных лесов проходит примерно вдоль широтного участка реки Оки.

Смешанные широколиственно-еловые леса подзоны характеризуются очень разнообразным составом и степенью залесенности. Преимущественное распространение имеют сочетания елово-березовых, хвойно-мелколиственных, осиново-березовых, осиново-сосновых лесов наряду с чисто еловыми,

березовыми лесами и сосновыми борами. Разнообразие состава тесно связано с рельефом, экспозицией склонов, характером и увлажненностью почво-грунтов. Лесистость бассейнов рек в пределах подзоны изменяется очень сильно. Участки с наиболее плодородными почвами и рельефом, удобным для распашки, практически безлесны (рисунок 1.1, 1.2). На повышенных участках Смоленско-Московской возвышенности и Клинско-Дмитровской гряды встречаются широколиственные леса (дуб, клен, ясень), а на пониженных участках – еловые, елово-березовые, сосново-березовые, осиново-сосновые. На зандровых песчаных равнинах наиболее распространены мелколиственно-сосновые леса.

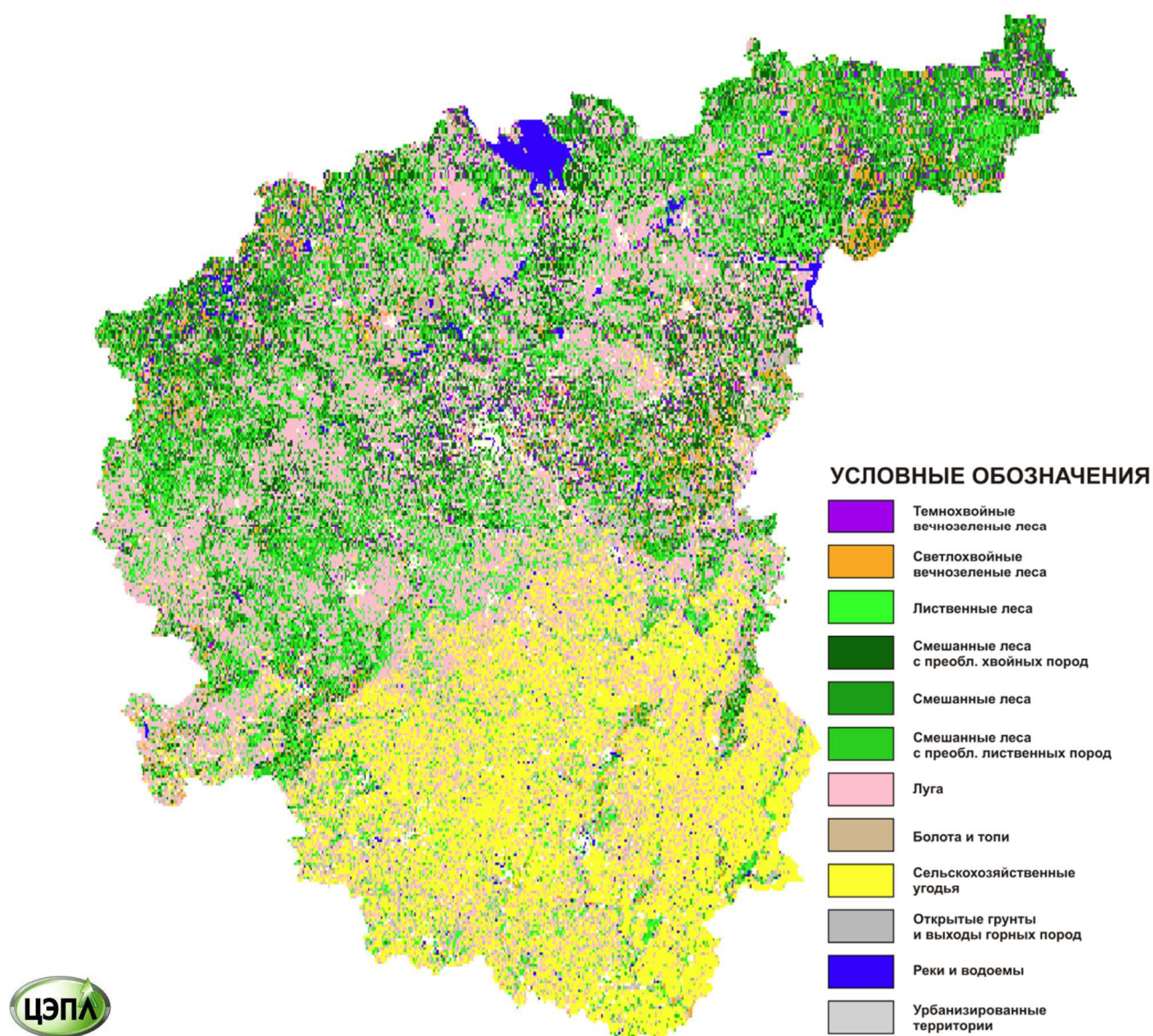


Рисунок 1.1 – Картосхема растительности наземных экосистем Центрального федерального округа на 2014 г. [4].

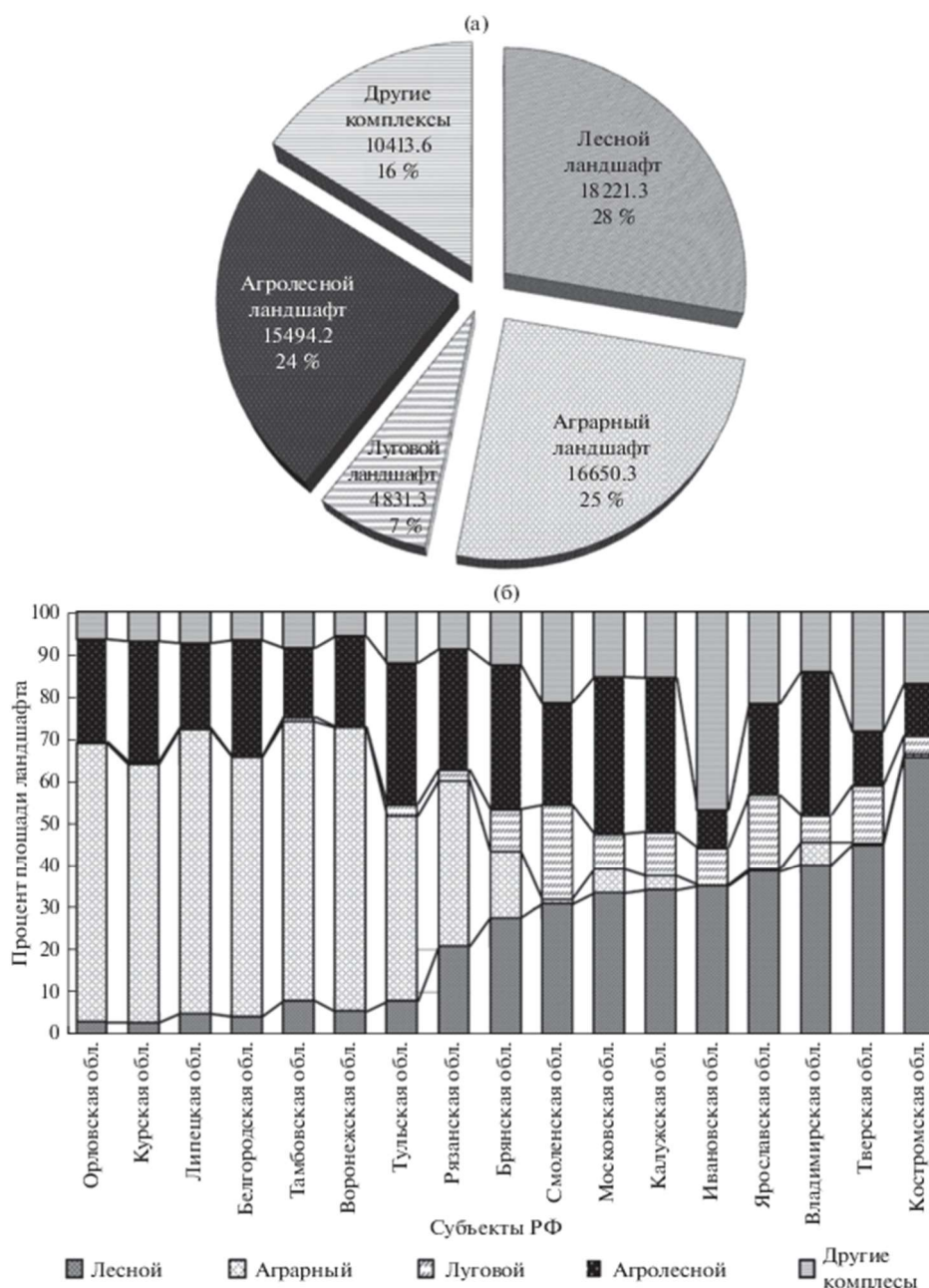


Рисунок 1.2 – Распределение площадей ландшафтов по Центральному федеральному округу (а) и по отдельным субъектам (б) [4].

В лесостепной зоне леса располагаются преимущественно по балкам, чаще всего это дубняки и орешники с подлеском из степных видов кустарника. Встречаются вторичные лесонасаждения (береза, осина). В пределах Окско-Донской низменности естественная растительность почти не сохранилась. Леса, представленные главным образом дубравами, уцелели лишь небольшими участками. В понижениях. встречаются осиновые и дубово-осиновые рощи, а на участках песчаных отложений кое-где уцелели сосновые леса с дубом.

Луговая растительность повсеместно распространена в лесной зоне небольшими участками. Суходольные луга занимают в основном лесные опушки, поляны и вырубки. Плохо дренируемые западины, ложбины, окраины болот заняты низинными лугами. Большое распространение имеют пойменные луга в восточной части округа. Крупные луговые массивы имеются в долинах Волги, Оки, Клязьмы и других рек. В лесостепной зоне луговая растительность сохранилась преимущественно на склонах долин, балок и лощин.

Растительность низинных болот, широко распространенных в пределах Верхневолжской и Унжинско-Ветлужской низменностей, представлена в основном различными видами осок и влаголюбивым разнотравьем. Для верховых болот наиболее характерны сфагновые мхи. Для переходных болот характерно сочетание сфагновых мхов с пушицей, осоками или гипновыми мхами.

2 МЕТОДЫ РАСЧЕТА СРЕДНЕМНОГОЛЕТНЕГО ИСПАРЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ СУШИ

2.1 Способы определения испарения

Для выполнения данной работы необходим метод определения годового среднего многолетнего испарения в зависимости от изменяющихся климатических факторов. В нашей стране существует три способа [11] определения такого испарения: по карте изолиний испарения (рисунок 2.1), опубликованной в 1976 г.; по методу А. Р. Константинова, осуществляющему определение испарения по температуре и влажности воздуха с помощью номограммы (рисунок 2.2); по уравнениям связи. Такими уравнениями в гидрометеорологической литературе в настоящее время называют уравнения, связывающее норму годового испарения с нормой годовых осадков и испаряемости. Существует некоторое количество уравнений связи, и одна из задач данной работы рассмотреть их и выбрать подходящее.

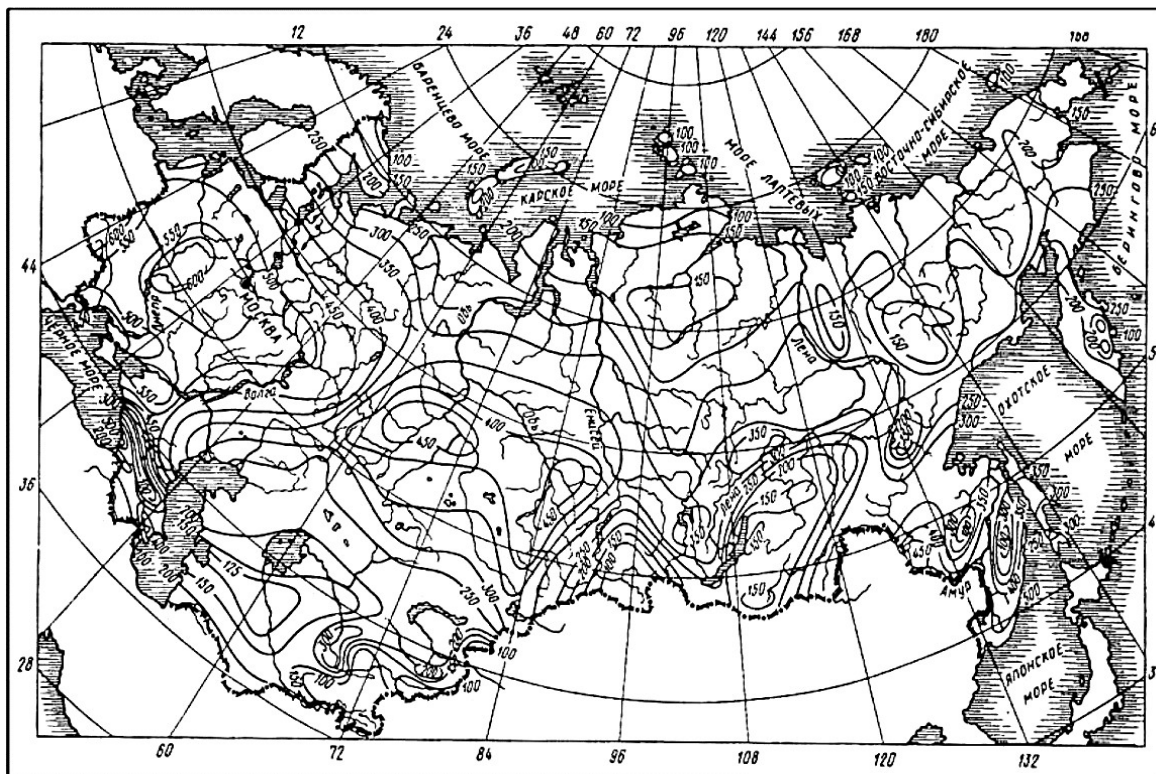


Рисунок 2.1 – Карта изолиний испарения с поверхности суши в миллиметрах.

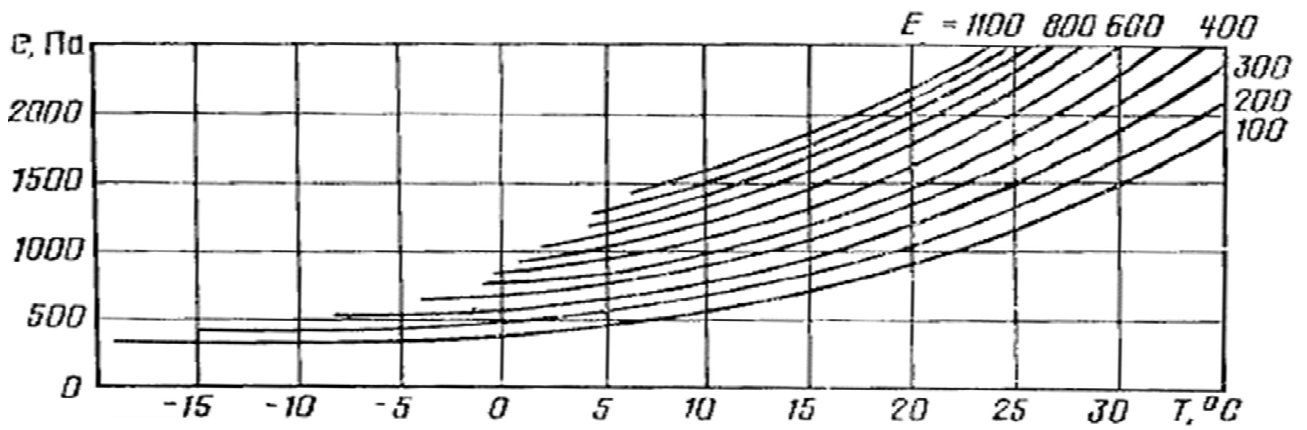


Рисунок 2.2 – Номограмма для расчета испарения по методу А. Р. Константинова.

2.2 Уравнения связи

Взаимосвязь испарения с атмосферными осадками стремятся описать с давних пор. Первым известным уравнением связи, по-видимому, можно считать уравнение немецкого гидролога Шрейбера (начало 20 века) [6]:

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

Также известны уравнения [6] Э. М. Ольдекопа:

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

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 [2], 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:

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

Здесь E , E_0 и x – годовые нормы испарения, испаряемости и осадков соответственно;

$E_{(1)}$ и $E_{(2)}$ – испарение, рассчитанное по формулам (2.1) и (2.2) соответственно;

k , n и A – параметры, определяемые 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. Уравнения (2.1), (2.2) и (2.5) содержат только один параметр – испаряемость E_0 , которая обуславливается только метеорологическими факторами, на что указывает выше приведенное определение. Так как для среднемноголетних 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 $E = f(x)$. Однако физический смысл параметров n и A определен нечетко, что является определенным недостатком этих уравнений.

Н. А. Багров [6] считал, что первая производная стока y 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 среднегодовых 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):

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

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 побуждают к поискам другой форме уравнения связи. По всем приведенным выше формулам испарение зависит от осадков и испаряемости, т.е. от внешних, относительно данного водосбора, факторов. Получается так, что эти формулы не содержат информации о самом водосборе. А. Н. Постников попытался найти другую форму уравнения связи [7], 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 поверхностью 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 осадками некоторого значения x_0 испарение сравняется 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 максимального 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

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

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:

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

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.

x_1 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 определяться общим уровнем увлажнения: у влажных почв x_1 будет меньше, чем у пересушенных. По этой причине, по-видимому, x_1 может возрасти при переходе от лесной к лесостепной и далее к 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_1 принять равным нулю (вследствие отсутствия данных), то из уравнения (2.18) получим уравнение (2.10). График функции

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

в зависимости от переменной x/E_0 представлен на рисунке 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.

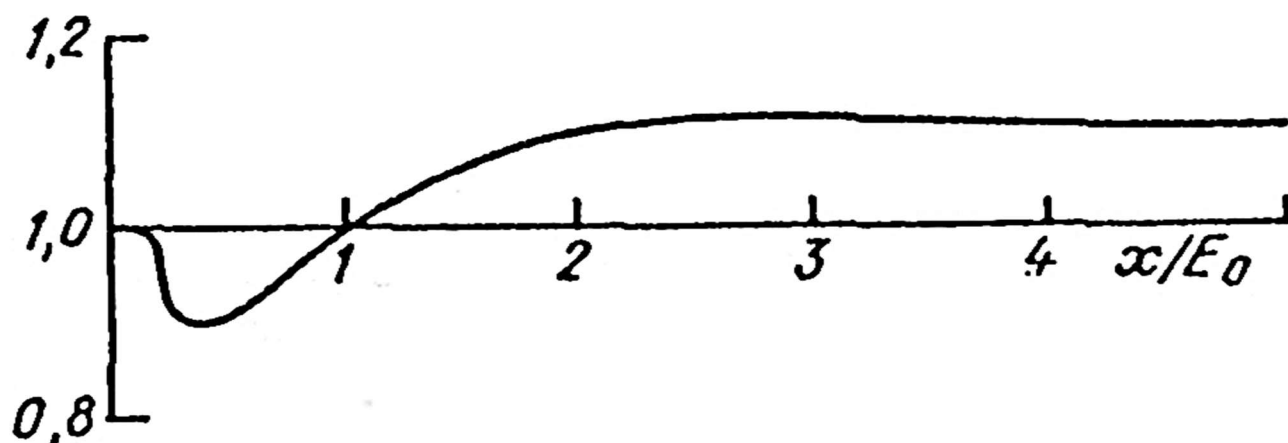


Рисунок 2.3 – Функция $-z = f(x/E_0)$.

Использование различных уравнений связи показывает, что при превышении осадков испаряемости в два раза, испарение становится близко к испаряемости. Если в систему (2.17) вложить $x_1 = 0$ 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 среднееголетних 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 изменяется от 0,77 до 1,22, в среднем принимается равным 0,9. По данному уравнению при $t < -10$ °С 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 одно уравнение связи [7]:

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

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 среднегодовых значений температуры воздуха за месяцы теплого периода года, деленная 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 этой 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 уравнениям 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	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	0,86	0,92	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
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/x наблюдается между уравнениями (2.2), (2.11) и (2.23), то есть уравнениями Ольдекопа, Багрова и Постникова.

По уравнениям (2.2), (2.5), (2.11), (2.20) и (2.23) производились расчеты испарения [8] для отдельных регионов бывшего Советского Союза, и результаты расчета сравнивались с данными карты среднего годового испарения, построенной в Государственном гидрологическом институте на основе уравнения водного баланса речного бассейна [11]. Погрешности определения испарения по этим уравнениям оказались близкими и в среднем составляли 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 территорий РФ, на которых преобладают формы равнинного рельефа. 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 СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА ЦЕНТРАЛЬНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

3.1 Исходные данные

Решено было сравнить средние многолетние значения осадков, испарения и стока за два периода. Первый период относится к эпохе стационарного климата, второй – к эпохе нестационарного климата. Первую эпоху – периодом до 1985 г. Вторую эпоху решено было характеризовать периодом с 1986 по 2015 гг., т.е. 30-летним периодом, как это принято у метеорологов в последнее время для определения климатических характеристик.

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 данным 29 метеостанций Центрального федерального округа (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Метеостанции, по данным наблюдений которых проводились
расчеты

Станция	Индекс станции	Широта, °	Долгота, °	Высота над уровнем моря
Тверская область				
Бологое	26298	57,90	34,05	186
Торопец	26479	56,48	31,63	187
Старица	26499	56,48	34,92	184
Максатиха	27208	57,80	35,90	140

Станция	Индекс станции	Широта, °	Долгота, °	Высота над уровнем моря
Смоленская область				
Смоленск	26781	53,25	34,32	236
Брянская область				
Брянск	26898	53,25	34,32	214
Красная Гора	26976	53,01	31,60	147
Трубчевск	26997	52,58	33,77	177
Костромская область				
Кологрив	27164	58,82	44,32	150
Кострома	27333	57,73	40,78	125
Ярославская область				
Переславль-Залесский	27425	56,71	38,83	174
Московская область				
Можайск	27509	55,52	36,00	184
Коломна	27625	55,13	38,73	112
г. Москва				
Москва, ВДНХ	27612	55,83	37,62	147
Рязанская область				
Елатьма	27648	54,95	41,77	132
Рязань	27730	54,58	39,70	155
Павелец	27823	53,78	39,25	209
Калужская область				
Сухиничи	27707	54,08	35,35	237
Тульская область				
Плавск	27814	53,65	37,23	240
Тамбовская область				
Тамбов	27947	52,80	41,48	127

Станция	Индекс станции	Широта, °	Долгота, °	Высота над уровнем моря
Курская область				
Поныри	34003	52,32	36,30	247
Курск	34009	51,77	36,17	246
Липецкая область				
Конь-Колодезь	34026	52,15	39,15	135
Брянская область				
Богородицкое-Фенино	34110	51,16	37,35	223
Готня	34202	50,80	35,76	225
Валуйки	34321	50,21	38,10	111
Воронежская область				
Воронеж	34123	51,70	39,22	147
Каменная Степь	34139	51,05	40,70	193
Калач	34247	50,42	41,05	90

3.2 Нормы годовых осадков и температуры воздуха за теплый период

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

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

Станция	Первый период		Второй период		Изменение	
	x , мм	$t_{п}$, мм	x , мм	$t_{п}$, мм	Δx , мм	$\Delta t_{п}$, мм
Бологое	702	6,3	712	6,7	10	0,4
Торопец	751	6,6	807	7,0	56	0,4
Старица	698	6,5	750	6,9	52	0,4
Смоленск	734	6,7	773	7,2	38	0,5

Станция	Первый период		Второй период		Изменение	
	x , мм	$t_{п}$, мм	x , мм	$t_{п}$, мм	Δx , мм	$\Delta t_{п}$, мм
Брянск	688	7,3	725	7,8	37	0,5
Красная Гора	614	7,5	681	8,0	67	0,5
Трубчевск	685	7,6	626	7,9	-58	0,3
Кологрив	672	5,9	596	6,2	-76	0,3
Максатиха	701	6,4	707	6,7	6	0,3
Кострома	660	6,5	672	6,9	13	0,4
Переславль-Залесский	643	6,6	637	7,0	-6	0,4
Можайск	647	6,7	719	7,2	72	0,5
Москва, ВДНХ	715	7,2	714	7,6	-1	0,4
Коломна	603	7,1	600	7,7	-3	0,6
Елатьма	633	7,1	674	7,5	41	0,4
Сухиничи	645	6,9	663	7,4	19	0,5
Рязань	609	7,3	610	7,7	2	0,4
Плавск	591	7,3	664	7,6	73	0,3
Павелец	569	7,2	555	7,6	-14	0,4
Тамбов	524	7,8	595	8,3	71	0,5
Поныри	671	7,3	652	7,8	-19	0,5
Курск	678	7,7	685	8,3	7	0,6
Конь-Колодезь	601	7,9	637	8,5	36	0,6
Богородицкое-Фенино	601	7,8	637	8,2	36	0,4
Воронеж	601	8,1	637	8,6	36	0,5
Каменная Степь	487	8,1	495	8,7	9	0,6
Готня	659	8,0	645	8,4	-14	0,4
Калач	487	8,6	495	8,9	9	0,3
Валуйки	563	8,6	612	9,0	50	0,4

Норма годовых осадков в среднем по округу за первый период составила 644 мм, за второй период – 662 мм. Изменение количества осадков оказалось неравномерным по территории округа, имеет место как его увеличение (максимум 73 мм, 12 % от значения за первый период), так и его уменьшение (максимум –76 мм, 11 % от значения за первый период). В среднем по округу норма осадков увеличилась на 18 мм, что от среднего значения за первый период составляет 3%. Объяснить неравномерность изменения можно тем, что среднее количество осадков меняется неоднородно в зависимости от атмосферной циркуляции, а изменение климата лишь влияет на частоту экстремальных значений осадков, увеличение которой наблюдается по всей планете, за счет роста содержания водяного пара в атмосфере [1].

Норма среднегодовой температуры $t_{п}$ в среднем по округу за первый период составила 7,3 °С, за второй период 7,7 °С. На всех станциях произошло повышение значения температуры $t_{п}$, в среднем по округу оно составило 0,4 °С, максимальное 0,6 °С, минимальное 0,3 °С. Если разделить округ на примерно равные части, то в южной части изменение в среднем составило 0,5 °С, в северной 0,4 °С.

3.3 Нормы испарения и стока

По формулам (2.7), (2.23)–(2.25) рассчитываются нормы годового испарения и стока, расчет представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты расчета норм годового испарения и стока

Станция	Первый период				Второй период				Изменение в мм	
	E_0 , мм	z	E , мм	Y , мм	E_0 , мм	z	E , мм	Y , мм	ΔE	ΔY
Бологое	580	1.94	497	205	614	1.83	516	196	19	-9
Торопец	606	2.01	524	226	640	2.06	558	249	34	23
Старица	597	1.85	503	194	631	1.89	536	214	33	19

Станция	Первый период				Второй период				Изменение в мм	
	E_0 , мм	z	E , мм	Y , мм	E_0 , мм	z	E , мм	Y , мм	ΔE	ΔY
Смоленск	614	1,91	523	211	656	1,87	555	218	32	7
Брянск	664	1,57	526	162	704	1,56	556	169	30	7
Красная Гора	681	1,31	497	117	720	1,39	541	140	45	22
Трубчевск	689	1,49	533	151	712	1,27	511	115	-22	-37
Кологрив	544	2,00	470	202	571	1,59	454	141	-16	-60
Максатиха	588	1,90	500	200	614	1,81	514	193	14	-7
Кострома	597	1,71	490	170	631	1,63	508	164	18	-6
Переславль-Залесский	606	1,62	487	157	640	1,49	496	141	9	-15
Можайск	614	1,61	491	156	656	1,69	536	183	45	27
Москва, ВДНХ	656	1,68	534	181	689	1,57	546	168	12	-13
Коломна	648	1,36	482	121	697	1,23	494	107	11	-14
Елатьма	648	1,45	497	136	681	1,48	526	148	29	12
Сухиничи	631	1,54	496	148	673	1,47	518	145	22	-3
Рязань	664	1,34	490	119	697	1,26	499	111	9	-8
Плавск	664	1,28	481	110	689	1,43	524	140	43	30
Павелец	656	1,24	467	102	689	1,13	466	89	0	-13
Тамбов	704	1,02	451	73	743	1,12	501	94	50	21
Поныри	664	1,52	519	152	704	1,35	523	130	4	-22
Курск	697	1,45	533	146	743	1,35	550	135	17	-10
Конь-Колодезь	712	1,20	498	103	758	1,19	528	109	31	6
Богородицкое-Фенино	704	1,22	496	105	735	1,24	523	114	27	9
Воронеж	728	1,17	501	100	766	1,18	530	107	29	7
Каменная Степь	728	0,89	430	57	773	0,85	441	54	12	-3
Готня	720	1,33	530	128	751	1,23	531	114	1	-14
Калач	766	0,84	434	52	787	0,83	443	52	9	0
Валуйки	766	1,01	485	77	795	1,07	521	91	36	14

Норма годового испарения в среднем по округу за первый период составила 495 мм, за второй период – 515 мм. Увеличение нормы испарения

произошло почти на всех станциях, за исключением двух: Трубчевск (Брянская область) и Кологрив (Костромская область), удаленных друг от друга и находящихся у границы округа. Именно на этих станциях наблюдаются минимальные увеличения значения температуры t_n и максимальные понижения нормы осадков. Среднее увеличение по округу составило 23 мм, т.е. 5 % от среднего значения за первый период, среднее изменение – 20 мм, т.е. 4 %.

Норма годового стока в среднем по округу за первый период составила 140 мм, за второй период – 139 мм. Норма стока в окрестностях рассматриваемых станций как повышается (максимум 30 мм, 5 % от значения за первый период), так и понижается (максимум –60 мм, 9 % от значения за первый период). Среднее изменение по округу составило лишь –1 мм, т.е. можно сказать, что сток в среднем по территории округа под влиянием климата на уровень 2015 г. практически не изменился.

3.4 Вклады в изменения норм испарения и стока

Также представляет интерес расчет вкладов изменений количества осадков и температуры t_n в изменение нормы испарения и стока в процентном соотношении. Из уравнений (2.23)–(2.25) видно, что испарение зависит только от x и t_n , раз это так, то и сток, согласно уравнению (2.7), также является функцией от этих переменных. Изменение испарения и стока приближенно можно представить в виде [10]:

$$\Delta E = \frac{\partial E}{\partial t_n} \Delta t_n + \frac{\partial E}{\partial x} \Delta x, \tag{3.1}$$

$$\Delta Y = \Delta x - \Delta E = \Delta x - \frac{\partial E}{\partial t_n} \Delta t_n - \frac{\partial E}{\partial x} \Delta x = \left(1 - \frac{\partial E}{\partial x}\right) \Delta x - \frac{\partial E}{\partial t_n} \Delta t_n.$$

Вклады в процентах можно определить по формулам [9]:

$$\begin{aligned}
 V_{t_n E} &= \frac{\left| \frac{\partial E}{\partial t_n} \Delta t_n \right| \cdot 100\%}{\left| \frac{\partial E}{\partial t_n} \Delta t_n \right| + \left| \frac{\partial E}{\partial x} \Delta x \right|}, \\
 V_{xE} &= \frac{\left| \frac{\partial E}{\partial x} \Delta x \right| \cdot 100\%}{\left| \frac{\partial E}{\partial t_n} \Delta t_n \right| + \left| \frac{\partial E}{\partial x} \Delta x \right|}, \\
 V_{t_n Y} &= \frac{\left| \frac{\partial E}{\partial t_n} \Delta t_n \right| \cdot 100\%}{\left| \frac{\partial E}{\partial t_n} \Delta t_n \right| + \left| \left(1 - \frac{\partial E}{\partial x} \right) \Delta x \right|}, \\
 V_{xE} &= \frac{\left| \frac{\partial E}{\partial x} \Delta x \right| \cdot 100\%}{\left| \frac{\partial E}{\partial t_n} \Delta t_n \right| + \left| \frac{\partial E}{\partial x} \Delta x \right|},
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

где $V_{t_n E}$ — вклад Δt_n в ΔE ;

V_{xE} , $V_{t_n Y}$ и V_{xY} — аналогично.

При этом

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial E}{\partial x} &= \left(1 + \frac{x}{E_0} \right) e^{-z}, \\
 \frac{\partial E}{\partial t_n} &= \frac{dE_0}{dt_n} (1 - e^{-z}) + E_0 e^{-z} \frac{dz}{dt_n}, \\
 \frac{dE_0}{dt_n} &= 16.8 \left[0.99 + (4.01 + 0.06t_n) e^{0.11(6-t_n)} \right],
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

$$\frac{dz}{dt_n} = -\frac{dE_0}{dt_n} \frac{x}{E_0^2} \left(1 + \frac{x}{E_0}\right).$$

Определенные по данным формулам вклады представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Вклады в изменение испарения и стока

Станция	$V_{t_n E}, \%$	$V_{XE}, \%$	$V_{t_n Y}, \%$	$V_{XY}, \%$
Бологое	84	16	71	29
Торопец	50	50	30	70
Старица	47	53	31	69
Смоленск	61	39	43	57
Брянск	48	52	40	60
Красная Гора	24	76	25	75
Трубчевск	23	77	20	80
Кологрив	37	63	20	80
Максатиха	85	15	74	26
Кострома	74	26	64	36
Переславль-Залесский	84	16	79	21
Можайск	35	65	27	73
Москва, ВДНХ	97	3	95	5
Коломна	92	8	91	9
Елатьма	36	64	32	68
Сухиничи	64	36	58	42
Рязань	90	10	90	10
Плавск	14	86	15	85
Павелец	52	48	56	44
Тамбов	13	87	20	80
Поныри	62	38	57	43
Курск	82	18	80	20

Станция	$V_{t_n E}, \%$	$V_{XE}, \%$	$V_{t_n Y}, \%$	$V_{XY}, \%$
Конь-Колодезь	35	65	40	60
Богородицкое-Фенино	27	73	31	69
Воронеж	29	71	35	65
Каменная Степь	51	49	69	31
Готня	55	45	56	44
Калач	30	70	51	49
Валуйки	14	86	21	79

Анализируя таблицу 3.4, можно сказать, что есть станции как с большим вкладом изменения температуры t_n , так и с большим вкладом изменения количества осадков, а также с примерно равным вкладом обоих составляющих. Это верно и для изменения испарения, и для изменения стока.

Средний на территории округа вклад $V_{t_n E}$ составил 52%, V_{XE} – 48%, $V_{t_n Y}$ – 49%, V_{XY} – 51%. Таким образом, изменение температуры t_n и количества осадков вносят практически одинаковые вклады на территории рассматриваемого округа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной выпускной квалификационной работы было выполнено:

- а) изучение природных условий территории исследования;
- б) исследование методов определения нормы годового испарения;
- в) выбор подходящего метода;
- г) сбор необходимых исходных данных, их обработка;
- д) расчет и анализ составляющих водного баланса;
- е) расчет и анализ вкладов в изменения норм испарения и стока.

Физико-географическое описание исследуемого округа было представлено в главе 1. Различные методы определения нормы годового испарения были представлены в главе 2, в ней же было дано обоснование выбора уравнения связи, которое было получено на кафедре инженерной гидрологии нашего университета. Исходными данными являлись среднемесячные температуры воздуха и месячные суммы осадков по 29 метеостанциям рассматриваемого округа. По исходным данным были определены нормы годовых осадков и температуры воздуха за теплый период за два расчетных периода. В среднем по округу норма осадков увеличилась на 18 мм, что от среднего значения за первый период составляет 3 %. На всех станциях произошло повышение значения температуры $t_{п}$, в среднем по округу оно составило 0,4 °С. Далее были рассчитаны нормы годового испарения и стока двух периодов. Среднее изменение нормы испарения по округу составило 20 мм. Среднее изменение стока по округу составило лишь –1 мм.

Подводя итоги, можно сказать, что изменения климата на уровень 2015 г. увеличили испарение в среднем по округу на 5 % и не привели к заметным изменениям стока на территории Центрального федерального округа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 *Lehmann, J. Increased occurrence of record-wet and record-dry months reflect changes in mean rainfall* [Текст] / *J. Lehmann, F. Mempel, D. Coumou* // *Geophysical Research Letters*. – 2018. – Том 45, Вып. 24. – С. 13468–13476
- 2 Будыко, М. И. Климат и жизнь [Текст] / М. И. Будыко. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1971. – 472 с.
- 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 05.05.2023.
- 4 Ершов, Д. В. Оценка биоразнообразия Центрального федерального округа по спутниковой карте наземных экосистем [Текст] / Д. В. Ершов, А. С. Исаев, Н. В. Лукина, Е. А. Гаврилюк, Н. В. Королева // *Лесоведение*. – 2015. – № 6. – С. 403–416.
- 5 Карандеева, М. В. Геоморфология Европейской части СССР [Текст]: учебное пособие для университетов / МГУ им. М. В. Ломоносова. – Москва: Издательство Московского университета, 1957. – 314 с.
- 6 Методы изучения и расчета водного баланса [Текст]. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1981. – 396 с.
- 7 Постников, А. Н. К оценке среднемноголетнего суммарного испарения с поверхности суши на основе уравнений связи [Текст] / А. Н. Постников // *Труды РГГМУ*. – 1999. – № 123. – С. 141–152.
- 8 Постников, А. Н. Об использовании различных уравнений связи для определения норм годового испарения [Текст] / А. Н. Постников // *Ученые записки РГГМУ*. – 2017. – № 50. – С. 126–137.
- 9 Постников, А. Н. О влиянии изменений климата на речной сток и испарение в Арктической зоне России [Текст] / А. Н. Постников // *Заметки ученого*. – 2023. – С. 343–347.

10 Постников, А. Н. Ориентировочные оценки изменений норм речного стока на территории России под влиянием изменений климата [Текст] / А. Н. Постников // Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации» / РГГМУ. – Санкт-Петербург, 2019. – С. 268–269.

11 Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши [Текст] / М-во сельск. хоз-ва СССР. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1976. – 96 с.

12 Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 7. Донской район [Текст]: монография / ред. к.г.н. М. С. Протасьев. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1973. – 460 с.

13 Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 10. Верхневолжский район. Книга 1 [Текст]: монография / ред. Ю. Е. Яблоков. – Москва: Московское отделение Гидрометеиздата, 1973. – 477 с.