



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 Прогноз слоя стока весеннего половодья в
лесостепной зоне на малых и средних реках
на примере притока р. Дон

Исполнитель Зенин Дмитрий Андреевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель к .Г. Н., доцент
(фамилия, имя, отчество)

Постников Александр Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

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

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

"12" июня 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
1 Физико-географическое описание	5
1.1 Рельеф	6
1.2 Климат	8
1.3 Почвы и растительность	11
2 Долгосрочные прогнозы весеннего половодья равнинных рек	12
2.1 Уравнения водного баланса бассейна за период начало снеготаяния – окончание половодья и за период снеготаяния	14
2.2 Снежный покров и количество осадков за период снеготаяния и половодья	17
2.3 Потери воды на испарение, инфильтрацию и поверхностное задержание	19
2.4 Инфильтрация воды в мерзлую почву	20
2.5 Методы расчета и прогноза потерь стока весеннего половодья	21
3 Результаты расчета и прогноза стока весеннего половодья	26
3.1 Расчет и прогноз стока половодья с применением формулы $P=P_0(1-e^{-S+X/P_0})$	30
3.2 Расчет и прогноз стока весеннего половодья с применением формулы $P=P_0th(S+X/P_0)$	37
Заключение	40
Список использованных источников	41

ВВЕДЕНИЕ

Цель данной дипломной работы – освоение методов расчета и прогнозирования слоя стока весеннего половодья малых и средних рек лесной зоны России на примере правого притока Дона реки Тихая Сосна.

Потребность в гидрологических прогнозах обоснована тем, что реки имеют изменчивый режим, что влияет на жизнь людей и их хозяйственную деятельность. Такие прогнозы основаны на выявленных закономерностях различных процессов в заданных физико-географических условиях.

Гидрологические прогнозы разделяются на несколько видов. Зависит это от характера элементов прогноза, заблаговременности предсказываемых элементов, назначения и других признаков.

По характеру прогнозируемых элементов режима гидрологические прогнозы разделяются на ледовые и водные прогнозы:

1. Ледовые прогнозы – это прогнозы, описывающие даты и сроки появления и исчезновения ледового покрова рек, озер и водохранилищ, прочность льда и другие параметры.

2. Водные прогнозы – это прогнозы, в которые входят: уровень воды в сезон, уровень стока паводка, время прихода максимума половодья, максимальные расходы и уровни половодья и паводков, средние расходы за определенные календарные промежутки и на конкретные даты и другие.

По заблаговременности прогнозы делят на:

1. Краткосрочные с заблаговременностью до 15 суток
2. Среднесрочные с заблаговременностью от 15 суток до 1 месяца
3. Долгосрочные с заблаговременностью от одного месяца и более.

Прогноз стока весеннего половодья представляет собой заблаговременное определение суммарных потерь стока, иными словами нужно выяснить какими будут максимальный расход и объем стока за период половодья.

Долгосрочные прогнозы слоя стока весеннего половодья имеют важное значение для обеспечения функционирования множества отраслей хозяйства. Изучение закономерностей формирования весеннего стока и разработка методик его прогноза являются одними из актуальных задач гидрологии. Иными словами, гидрологические прогнозы необходимы для предсказания таких опасных природных явлений, как засухи и наводнения, и своевременного предупреждения и реагирования на них. Для этого требуется качественная прогностическая информация, поэтому составление методик прогноза элементов режима рек во время весеннего половодья имеет важное значение.

Основными задачами данной работы являются: изучение формирования слоя стока половодья и его потерь, исследование методов расчета и прогноза слоя стока, оценка пригодности этих методов на примере притока р. Дон – реки Тихая Сосна.

1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА

Бассейн реки Дон располагается в европейской части России и вытянут в основном в меридиональном направлении, занимаемая им площадь составляет около 422 тыс. км². Дон берет свое начало на Среднерусской возвышенности на высоте 180 метров над уровнем моря. Дон занимает пятое место по протяженности среди рек Европы. Средний расход воды – 680 м³/с.

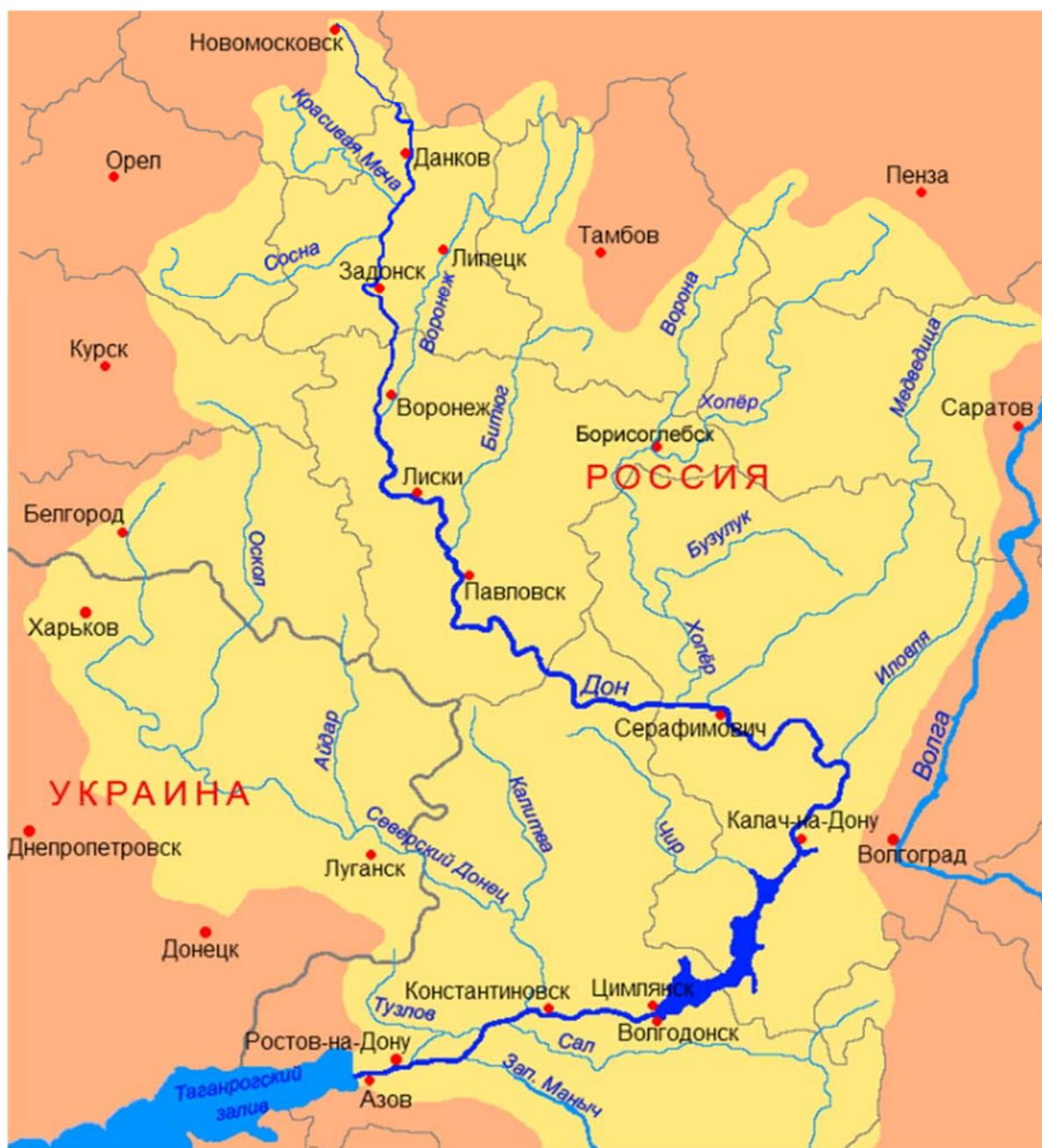


Рисунок 1 Схематическое изображение Донского района.

1.1 Рельеф

По характеру рельефа, геологическому строению и географическому положению Донской район можно разделить на две части: северную и южную. Граница между ними проходит с востока по Волго-Донскому каналу и опускается до параллели 48° к западу.

Северная, большая часть района, представлена разнообразным рельефом и геологическим строением. В западной части расположены восточные склоны Среднерусской возвышенности, которую можно описать как эрозионную возвышенную равнину с преобладающим долинно-балочным рельефом. Имея общий слабый наклон на восток, она крутыми уступами обрывается к долинам рек Воронежа и Дона.

На юго-востоке Среднерусская возвышенность переходит в узкую Восточно-Донскую гряду, которая служит водоразделом между Доном и левыми притоками Северского Донца, а так же бассейном р. Чир. Эта гряда проходит от верховьев р. Богучарки к юго-востоку до Цимлянского водохранилища на протяжении 300 километров. Высоты ее немного превышают 200 м, доходя в крайней восточной части до 252 м. По рельефу Восточно-Донская гряда является резко асимметричной. Ее северные склоны, обращенные к долине Дона, короткие и крутые, южные – более пологие.

Между р. Доном и его притоком – р. Хопра – находится Калачская возвышенность, имеющая вид плато высотой 200-300 м, разделенное глубокими долинами рек, балками и оврагами. В геологическом и морфологическом отношении Калачская возвышенность является продолжением на восток Среднерусской возвышенности, от которой ее отделяет широкая долина р. Дона. Восточная часть бассейна р. Дона располагается в пределах южной половины Приволжской возвышенности и представляет возвышенную, слабонаклоненную на запад равнину с характерным структурно-эрозионным рельефом.

В южной части бассейна Дона основная площадь дренируется его левыми притоками, стекающими с западных склонов Ергеней и с северных склонов Ставропольской возвышенности. Ергени, вытянутые меридионально к югу от г. Волгограда, являются непосредственным орографическим продолжением Приволжской возвышенности и восточной границей бассейна Дона. Абсолютные их высоты постепенно повышаются от 160 м с севера до 218 м на юге в районе г. Элисты. По общему строению рельефа Ергени представляют собой резко асимметричную возвышенность с пологими западными и крутыми восточными склонами. Долины стекающих с Ергеней левых притоков Дона делят равнину на несколько плоских водоразделов широтного или близкого к нему направления. Высоты этих водораздельных гряд так же повышаются с севера на юг и понижаются в западном направлении.

К основным формам рельефа Донского района относятся речные долины, балки, овраги, карстовые образования, оползни и западины. К крупным речным долинам восточного склона Среднерусской возвышенности относятся долины следующих правых притоков Дона: Красивой Мечи, Сосны, Ведуги, Девицы, Потудани, Тихой Сосны, Калитвы, Богучарки и Чира. Верховье самого Дона также находится на восточном склоне этой возвышенности.

На правобережье Дона можно выделить три типа речных долин. Тип первый – долины северных притоков (рек Красивой Мечи и Сосны), выработанные в толще девонских известняков, относительно узкие, обладающие неширокими поймами и слабовыраженными надпойменными террасами, из которых чаще всего наблюдается только одна первая терраса, располагающаяся, как и пойма, внутри излучины реки.

Тип второй – долины, выработанные в толще пясчег мела и мергеля. К ним относятся долины рек Девицы, Потудани, Тихой Сосны, Калитвы и Богучарки. Эти долины лучше разработаны, чем долины в известняках,

несмотря на их более молодой возраст. При такой же глубине вреза они шире, прямее и имеют более выраженную асимметрию склонов.

К третьему типу относится широкая хорошо разработанная долина реки Чир, врезанная в основном в толщу песчано-глинистых отложений палеогена с прослоями опок и только в верховьях вскрывающая мел и мелоподобные отложения. Она имеет крутые правые склоны почти на всем протяжении, широкую пойму с множеством озер-стариц и надпойменные террасы, развитые преимущественно по левобережью.

1.2 Климат

Климат Донского района формируется под влиянием радиации, циркуляции и подстилающей поверхности. Радиационные факторы определяют радиационный баланс, а циркуляционные – увлажнение. Циркуляция также оказывает влияние на температуру воздуха, особенно в зимнее время года, когда влияние радиации ослаблено в силу маленькой продолжительности солнечного сияния.

По географическому положению данная территория находится под влиянием различных по физическим свойствам и происхождению воздушных масс: холодных из Арктики, морских с Атлантики, сухих из Казахстана и тропических из Средиземного бассейна.

Зима на севере района начинается в начале ноября, а в южной – в конце. Продолжительность устойчивых морозов меняется от 110 дней до 60 соответственно. Весна приходит с юга бассейна в первой половине марта, и достигает севера только в начале апреля. Ее продолжительность в среднем составляет 45-60 дней. Лето в Донском районе сухое и жаркое и наступает в начале мая на юге, доходя до севера лишь к концу месяца. С началом осени (за это принята дата перехода среднесуточной температуры через 15°) температура воздуха и почвы понижается, наибольшее падение приходится на

конец сентября – начало октября. Средняя длительность осени составляет 60-70 дней.

Средняя годовая температура воздуха равномерно изменяется по территории от 4 на севере до 10 на юге. Ее распределение по территории показано на рисунке 2.

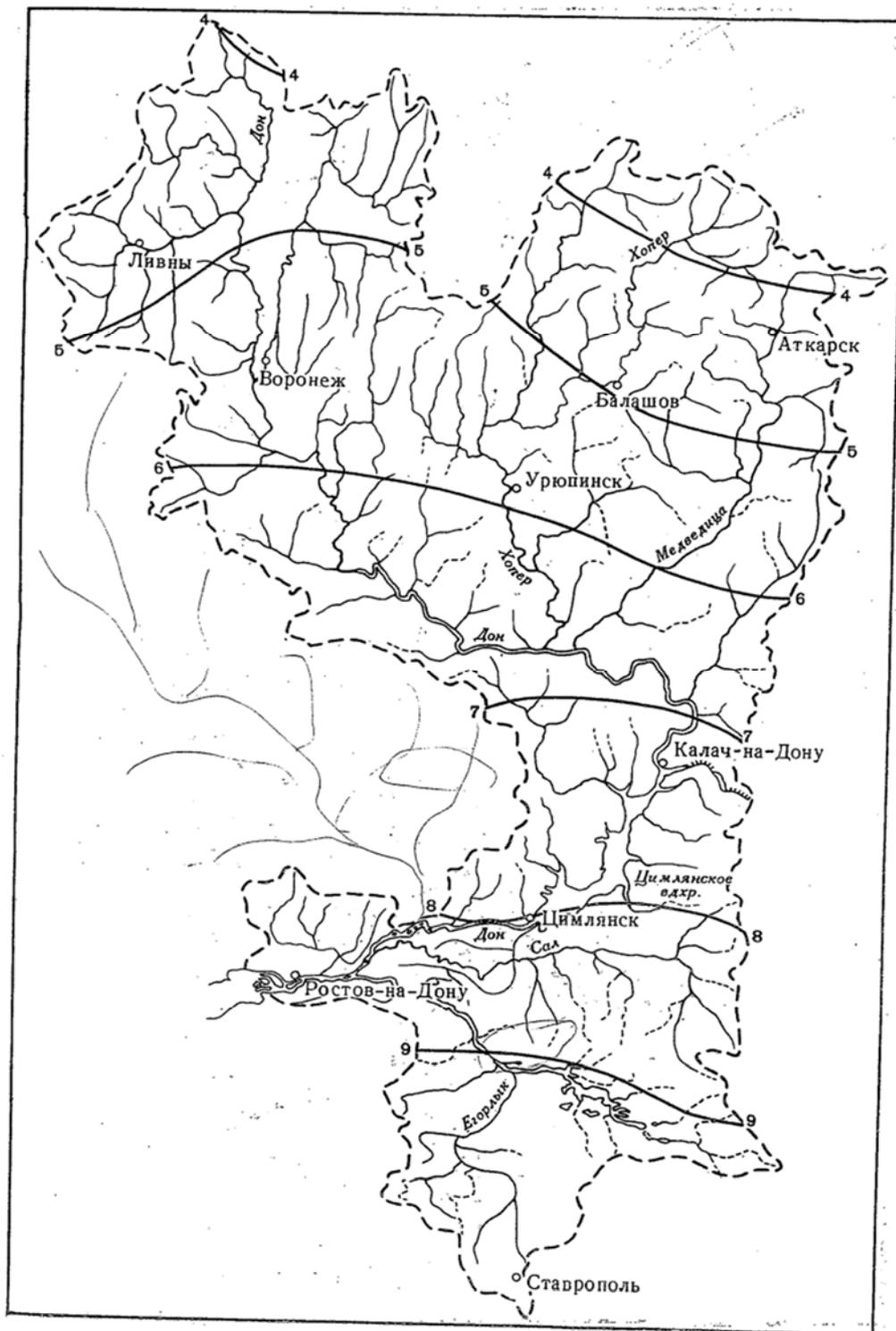


Рисунок 2 – средняя годовая температура.

Количество осадков за год без поправок к осадкомеру увеличиваются в Донском районе с юго-востока на северо-запад от 350 до 500 мм. На крайнем юге бассейна выпадает около 600 мм. Наибольшее количество осадков за год на всей территории составляют 650-780 мм. Относительная влажность воздуха в Донском районе изменяется в пределах 70-76%.

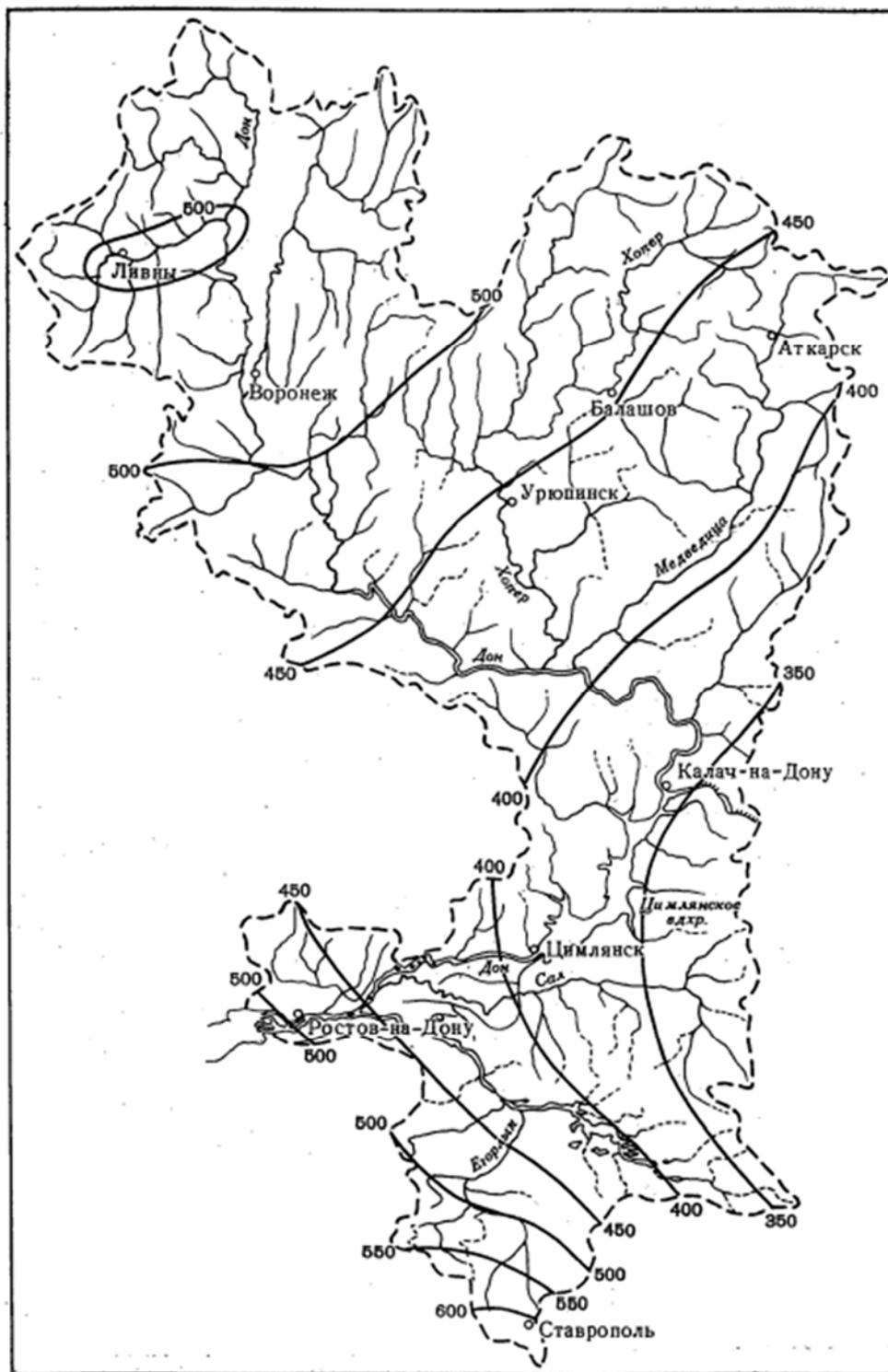


Рисунок 3 – среднее годовое количество осадков.

1.3 Почвы и растительность

Почвенный покров на территории Донского района неоднородный и имеет выраженную зональность в направлении с северо-северо-запада на юго-юго-восток. Дон протекает через три почвенно-географические зоны: лесостепная зона оподзоленных, выщелоченных и обычных черноземов; степная зона с обыкновенными и южными черноземами; сухостепная зона темно-каштановых и каштановых почв. Также есть различия в типах почв при движении с запада на восток и в их распределении в зависимости от местных условий, которые проявляются в отличии почв высоких водоразделов и пониженных равнин.

Растительность района представлена двумя типами: лесом и степью. В северной части преобладают леса, которые встречаются на водоразделах, в долинах рек и по балкам. В ландшафтном отношении север района – лесостепная зона. На юге района водораздельные леса отсутствуют и преобладают степи, а на крайнем юго-востоке – выпасы и сенокосы. Донской район густо заселен и хорошо освоен, поэтому естественный покров нарушен и изменился под воздействием хозяйственной деятельности.

2 МЕТОДИКА ДОЛГОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ ПОЛОВОДЬЯ РАВНИННЫХ РЕК

Как известно, с приходом зимы водный баланс речных бассейнов сильно меняется. Основной причиной является то, что в зимний период на поверхности бассейнов скапливаются большие запасы воды в виде снега. А без наличия сильных оттепелей эти запасы не сильно меньше количества твердых осадков за всю зиму, потому что испарение со снежного покрова не превышает в сумме 20-30 мм.

Процесс накопления снега длится несколько месяцев, а его таяние весной происходит быстро (4-6 дней на юге и 20-35 на севере), при этом снеготаяние идет одновременно на огромных площадях. Во время этого процесса на поверхность бассейна поступает большое количество талой воды. А учитывая, что почва перед началом снеготаяния обычно мерзлая и имеет слабую водопроницаемость, становится понятно, почему мы ежегодно наблюдаем половодья на равнинных реках.

Продолжительность половодья на малых и средних реках обычно составляет 10-15 дней при безлесном бассейне и 25-40 дней, когда водосбор покрыт лесом. Такие сроки относительно короткие, в отличии от половодья на больших реках. На них этот процесс проходит заметно дольше, так как имеет место добегание талых вод от верховьев, которое длится 20-30 дней.

За начало половодья принимается первый день значительного повышения водности реки, после которого следует само половодье. Окончанием считают один из дней периода перехода интенсивного уменьшения расходов к совсем слабому. Этот период, как правило, короткий и характерен в общем небольшими расходами воды. Иногда для установления времени окончания половодья применяют экстраполяцию хода расходов воды с момента начала паводка, используя типовую кривую спада половодья, чтобы

не включить в объем стока дождевой паводок. Этот график также показывает положение границ половодья на гидрографе (рисунок 4).

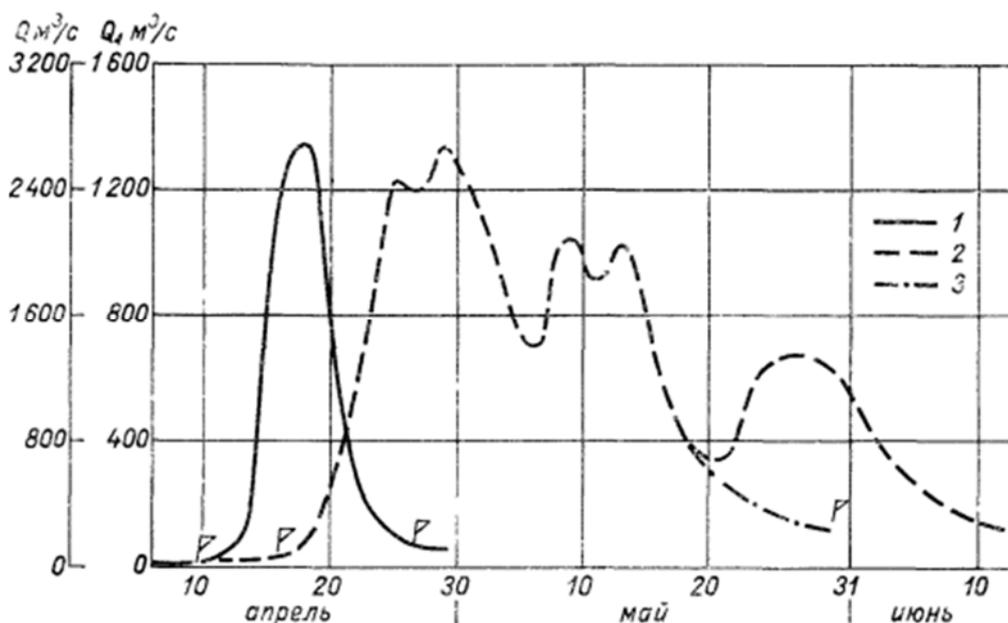


Рисунок 4 – пример гидрографов рек с датами начала и окончания половодья.

Сток за время половодья в среднем составляет 50-70% годового, а на некоторых реках достигает 90-95%. Весеннее половодье – одна из самых важных особенностей режима равнинных рек России для хозяйственного использования водных ресурсов. Основными элементами, характеризующими половодье, являются: максимальный расход, сток за половодье, время их наступления, дата начала половодья, наивысший уровень. Сток и другие характеристики половодья отличаются сильной изменчивостью из года в год, поэтому их заблаговременный прогноз носит особый интерес.

В настоящее время главными долгосрочными прогнозами половодья считаются прогнозы общей величины стока половодья, максимального расхода и уровня воды и срока его наступления, а также прогнозы стока за время спада половодья. Основой для таких прогнозов служат эмпирически устанавливаемые воднобалансовые зависимости стока от запаса воды в снеге перед началом снеготаяния, осадков и водопоглотительных способностях

бассейна. Для выявления этой зависимости необходимо иметь метеорологические и гидрологические данные наблюдений по заданному бассейну не менее чем за 20 лет.

2.1 Уравнения водного баланса бассейна за период начало снеготаяния – окончание половодья и за период снеготаяния

Уравнение водного баланса бассейна за период начало снеготаяния – окончание половодья можно записать в виде:

$$Y_{\text{т}} + Y_{\text{д}} = S + X_1 + X_2 - E_{\text{с}} - E_{\text{п}} \pm \Delta W_{\text{п}} \pm \Delta W_{\text{пз}} - Y_{\text{пз}}, \quad (1)$$

где $Y_{\text{т}}$ – поверхностный сток талых вод и от дождей (X_1), выпавших на тающий снежный покров; $Y_{\text{д}}$ – поверхностный сток от дождей (X_2), выпавших на участок бассейна, свободного от снега; S – запас воды в снежном покрове перед началом снеготаяния; $E_{\text{с}}$ – испарение с поверхности снежного покрова за период снеготаяния; $E_{\text{п}}$ – испарение с поверхности почвы; $\Delta W_{\text{п}}$ – изменение запаса воды во всей зоне аэрации; $\Delta W_{\text{пз}}$ – изменение запаса подземных вод; $Y_{\text{пз}}$ – подземный сток.

Уравнение (1) также относится к периоду половодья, когда его начало совпадает с началом таяния снега. То же самое мы можем сказать и про года, когда эти сроки расходятся, так как сток за время начало снеготаяния – начало половодья очень мал в сравнении с другими элементами водного баланса.

Уравнение (1) выражает водный баланс только приблизительно. Но неучтенные составляющие, такие как испарение с водной поверхности, изменение запасов воды в руслах рек и озерах и другие, чаще всего незначительны относительно учтенных в уравнении. Стоит отметить, что уравнение применяется и для бассейнов, наземный и подземный водоразделы которых совпадают, что бывает почти всегда, за исключением бассейнов малых рек. Таким образом это уравнение является достаточно универсальным. В таком виде уравнение (1) не совсем удобно для определения того, какие

факторы стока талых вод являются основными. Для этого нужно обратить внимание на одно обстоятельство. Как известно, испарение с поверхности почвы и транспирация, которая часто начинается раньше окончания половодья в замыкающем створе, происходят в основном за счет той воды, которая находится в почве, то есть ниже ее поверхности. Если рассматривать вариант, при котором эта вода попадает в реку, можно сделать вывод, что это возможно лишь после принимаемого времени конца половодья. Таким образом сумму $(E_{\text{п}} \pm \Delta W_{\text{п}} \pm \Delta W_{\text{пз}} + Y_{\text{пз}})$ допустимо рассматривать как величину инфильтрации талых и дождевых вод, обозначенных в уравнении (1) как S , X_1 и X_2 . По такой логике мы считаем, что вода, которая находится в различных бессточных углублениях, в основной массе впитывается в почву и включается в инфильтрацию. Таким образом, уравнение (1) можно записать в виде

$$Y_{\text{т}} + Y_{\text{д}} = S + X_1 + X_2 - E_{\text{с}} - I, \quad (2)$$

где I – инфильтрация талых и дождевых вод.

Если вместо периода половодья рассматривается период снеготаяния, можно получить уравнение

$$Y'_{\text{т}} = S + X_1 - E_{\text{с}} - I_{\text{т}} - U - (W_{\text{р}} - W'_{\text{р}}), \quad (3)$$

где $Y'_{\text{т}}$ – поверхностный сток в замыкающем створе от начала половодья до дня окончания снеготаяния; $I_{\text{т}}$ – инфильтрация за время снеготаяния; U и $W_{\text{р}}$ – количество воды на поверхности бассейна и в русловой сети соответственно при окончании снеготаяния; $W'_{\text{р}}$ – количество воды в русловой сети на момент окончания половодья (остальные обозначения те же).

Уравнения (3) и (4) применимы только для степных, сухостепных и лесостепных зон, в которых величина U не превышает нескольких миллиметров. Для таких бассейнов можно считать, что вода в бессточных углублениях впитывается полностью в почву уже почти во время завершения снеготаяния. Тогда

$$Y_{\text{т}} = S + X_1 - E_{\text{с}} - I'_{\text{т}}, \quad (4)$$

где $I'_{\text{т}} = I_{\text{т}} + U$.

Исходя из выше изложенного и уравнения водного баланса, можно прийти к выводу, что в сухостепной, лесостепной и степной зонах главными факторами поглощения талых вод бассейном являются обстоятельства, влияющие на инфильтрацию, впитывание воды в почву.

Уравнения (1)-(4) и количественная характеристика составляющих водного баланса позволяют не только понять, какие из факторов влияют на сток сильнее, но и получить аналитическое представление самой зависимости стока половодья от воздействующих на него параметров. Таким образом, можно сказать, что уравнение водного баланса половодья служит общей теоретической основой для разработок методов расчета и прогноза весеннего стока.

Под потерями талых вод P принято понимать

$$P = P + X_1 - (Y - Y_d - Y_{пз}) = S + X_1 - Y_T, \quad (5)$$

где Y – общий сток за период половодья; Y_T – сток талых вод на поверхности и по подземным путям. Здесь величина $Y_{пз}$ принимается как такой подземный сток, который не обусловлен талыми водами, то есть базисный подземный сток.

Так как условия потерь дождевых и талых вод достаточно различаются, то при выявлении зависимостей величины этих потерь от обуславливающих их факторов возникают дополнительные трудности.

Для удобства можно переписать формулу водного баланса (5) в виде

$$Y_T = S + X_1 - P, \quad (6)$$

можно сделать вывод, что прогноз стока талых вод сводится к прогнозу потерь этих вод, так как величины S и X_1 всегда заданы. Значение S находится по данных снегомерных съемок, а значение X_1 за прошлые года определяется на основе метеорологических наблюдений, а для весны, для которой делается прогноз, принимается что $X_1 = X_{1ср}$. Таким образом, возможность долгосрочного прогноза стока обусловлена возможностью заблаговременно оценить водопоглотительную способность бассейна.

2.2 Снежный покров и количество осадков за период снеготаяния и половодья

Для гидрологов основной характеристикой снежного покрова является запас воды в нем. Чем точнее измерения, тем точнее будут прогнозы стока за половодье и прочих равных условиях.

Снег распределяется по местности почти всегда неравномерно, что обусловлено в основном переносом снега ветром, а особенно во время сильных метелей. Поэтому для определения средней величины запаса воды в снежном покрове необходимо делать много измерений высоты и плотности снежного покрова, то есть проводить снегомерную съемку. В настоящее время на метеорологических станциях и постах снегомерные съемки проводятся в поле и лесу.

По данным снегомерных съемок строятся карты изолиний запаса воды в снежном покрове, например как на рисунке 5.

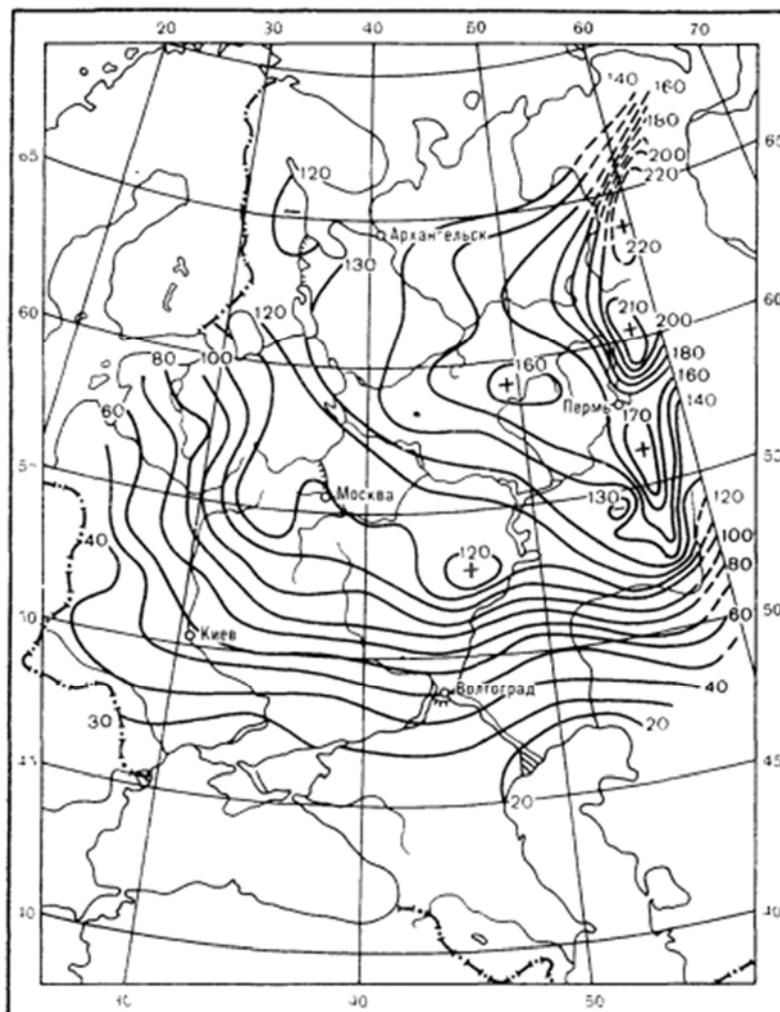


Рисунок 5 – средние значения максимальных запасов воды в снежном покрове по данным 1892-1960 гг.

При разработке методов прогнозов половодья используют только данные снегомерных съемок. Если брать за основу данные о твердых осадках, то точность определения запасов воды оказывается ниже. Исключение может быть для местностей, где снежный покров сильно неустойчив.

Также существует такое явление как ледяная корка на поверхности почвы. Оно характерно для центральных, западных и южных районов европейской части России. Появляется корка, как правило, в декабре – феврале в результате оттепелей и если почва слабо водопроницаема. Как показывает практика, корка чаще появляется местами и в различных углублениях. Запасы воды в ледяной корке не превышают 10 мм в пересчете на слой воды на всю

площадь водосбора. Однако иногда значения выше, и таяние ледяной корки может оказать серьезное влияние на формирование стока.

Если говорить об осадках, то условия их потерь за время снеготаяния те же, что и потери талых вод. Поэтому при расчетах эти осадки суммируются с запасом воды в снежном покрове и принимаются за одну общую величину поступления воды на поверхность бассейна за период снеготаяния.

2.3 Потери воды на испарение, инфильтрацию и поверхностное задержание

Испарение с поверхности тающего снежного покрова незначительно как на полях, так и в лесах. Как правило, оно не превышает 8-10 мм за все время снеготаяния. Суммарное же испарение (с почвы и транспирация) имеет более высокую интенсивность.

За период таяния снега на поверхность водосбора попадает слой воды высотой до 300 мм. Но интенсивность поступления в целом достаточно низкая, в несколько раз меньше интенсивности ливней. Однако несмотря на в общем невысокую интенсивность, большая часть воды стекает с водосбора. Это говорит о том, что впитывание воды в мерзлую почву еще ниже.

Объем воды, поглощаемый грунтами бассейна за период снеготаяния, и задерживаемый на поверхности измерить очень сложно. Поэтому этот параметр определяется из уравнения водного баланса за период снеготаяния.

Существует еще один вид потерь воды – потери на смачивание растительного покрова. Но из-за малых величин, нет надобности учитывать эти потери.

2.4 Инфильтрация воды в мерзлую почву

Как известно, половодье происходит весной, когда почва еще не успевает оттаять. Инфильтрация в мерзлый грунт подчиняется тем же силам тяжести и молекулярным силам, что и инфильтрация дождевой воды летом.

Отличительной особенностью мерзлого грунта естественно является наличие льда в порах почвы и минусовая температура. В зависимости от влажности почвы непосредственно перед замерзанием, в ней образуется либо сухая мерзлота (маленькие частицы льда в порах, иногда видимые только через увеличительные приборы), либо прослойка льда. Прослойка образуется при условии, что влажность почвы не ниже минимальной полевой влагоемкости.

Количество льда в объеме почвы называют льдистостью почвы. Соответственно, чем выше льдистость, тем меньше проницаемость воды в мерзлую почву. Этот параметр – важный фактор в инфильтрации талых вод. В гидрологии под количественной характеристикой льдистости понимают запас влаги в почве осенью в слое 0-50 или 50-100 см.

Для глубины промерзания грунтов характерна большая пространственная изменчивость, которая возникает из-за неравномерности распределения снежного покрова. Для определения промерзания почвы в зависимости от глубины пользуются интегральными кривыми распределения, которые строятся по данным специальных съемок (рисунок 6).

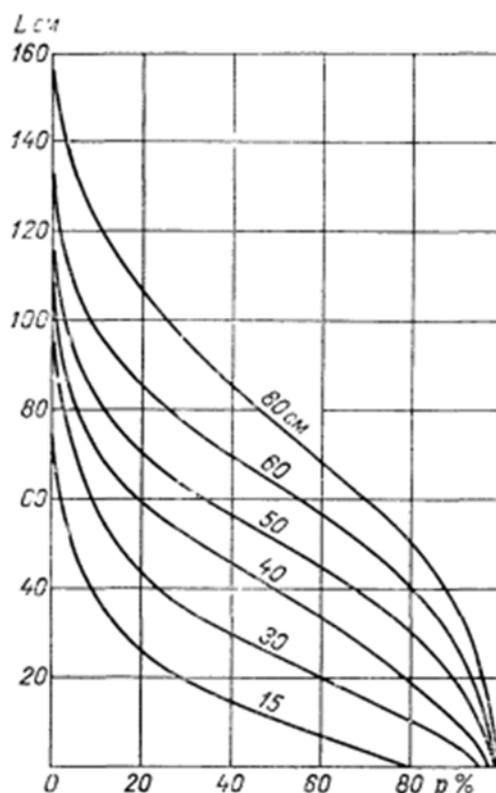


Рисунок 6 – Интегральные кривые распределения глубины промерзания.

Глубина промерзания – важная характеристика для вычисления инфильтрации, а значит и стока за период половодья. Так, чем больше глубина промерзания, тем ниже температура почвы, а значит сильнее льдистость, меньше мест, где почва не промерзла, и вода осталась талой.

2.5 Методы расчета и прогноза потерь стока весеннего половодья

Исходя из выше изложенного и уравнения водного баланса, можно прийти к выводу, что в сухостепной, лесостепной и степной зонах главными факторами поглощения талых вод бассейном являются обстоятельства, влияющие на инфильтрацию, впитывание воды в почву.

В записанном виде уравнение (1) не совсем удобно для определения того, какие факторы, влияющие на сток, следует считать основными.

Для удобства можно переписать уравнение водного баланса в виде

$$Y=S+X-P, \quad (7)$$

где S – запасы воды в снеге на начало снеготаяния; X – осадки за период снеготаяния и весеннего половодья; P – потери стока весеннего половодья.

Потери в общем случае формируются за счет поверхностного задержания, впитывания воды в почву и испарения. Благодаря исследованиям и расчетам сотрудников Гидрометцентра СССР было установлено, что потери стока половодья возникают в основном за счет поглощения воды в почву.

Исходя из этого было предложено два уравнения для расчета потерь:

$$P=P_0(1-e^{-(S+X)/P_0}) \quad (6)$$

$$P=P_0th((S+X)/P_0), \quad (7)$$

где P_0 – максимально возможные потери за половодье, при условии, что вся поверхность водосбора будет покрыта слоем воды на протяжении всего половодья; th – гиперболический тангенс.

Графики этих уравнений при $P_0=30, 70, 160$ мм показаны на рисунках (7) и (8).

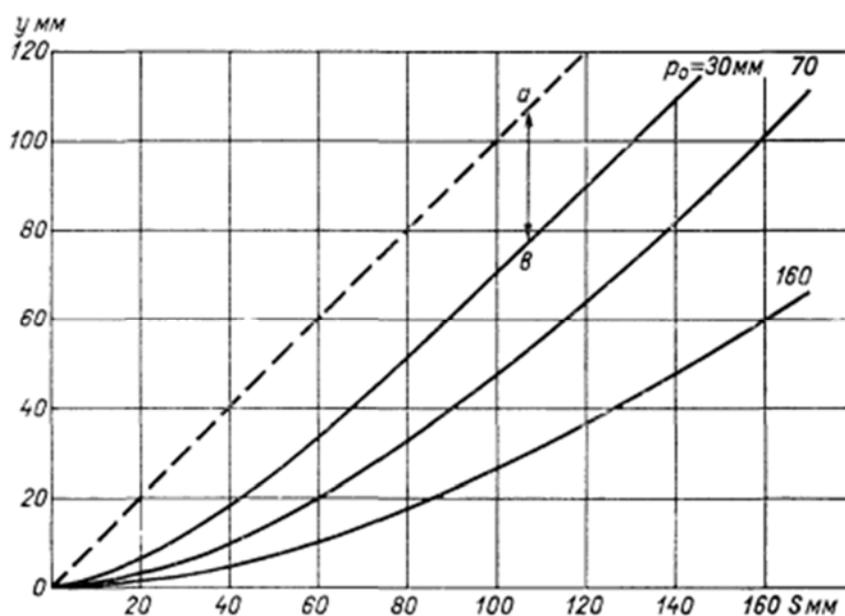


Рисунок 7 - График уравнения $P=P_0(1-e^{-S+X/P_0})$ при различных значениях P_0 .

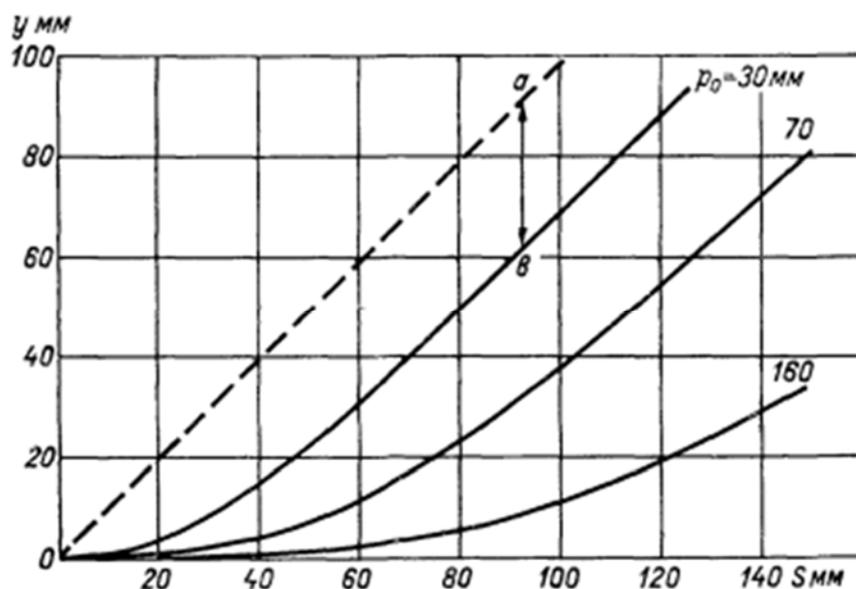


Рисунок 8 – График уравнения при различных значениях P_0 .

Параметр P_0 характеризует водопоглотительную способность бассейна перед началом снеготаяния и зависит от факторов, которые определяют водопроницаемость почвы и свободную поверхностную емкость в данный момент.

Основой методов долгосрочных прогнозов стока за период половодья служат эмпирически устанавливаемые зависимости величины стока от запаса воды в снежном покрове, осадками за время снеготаяния и показателей водопоглотительной способности бассейна, то есть его почв.

При наличии соответствующих данных устанавливаются зависимости. По своей сути эти зависимости – физико-статистические, причем в их основе лежит уравнение водного баланса бассейна, поэтому и можно называть эти зависимости воднобалансовыми. На практике при установлении зависимостей из общей величины стока за половодье базисный подземный сток не учитывается, потому что он незначителен, особенно для степных и лесостепных зон.

Рассматриваемая зависимость может быть установлена для целого района, если есть достаточно данных по бассейнам и сам район однороден в физико-географических условиях стока.

Для рек центральной части степной и лесостепной зон Европейской территории России была установлена зависимость параметра P_0 в выражении $Y=S-P_0(1-e^{S/P_0})$ от глубины промерзания и льдистости почвы (l и W соответственно). Из физических соображений можно считать, что при нормальной интенсивности снеготаяния

$$P_0=Ake^{-aW}, \quad (8)$$

$$k=e^{-bwl}, \quad (9)$$

где P_0 – параметр, характеризующий водопоглотительную способность бассейна до начала снеготаяния и представляющий собой максимально возможные потери талых вод при таянии снежного покрова с условно бесконечным запасом воды; W – льдистость почвы, показателем которой является запас влаги в слое почвы глубиной 50-100 см перед началом снеготаяния; l – глубина промерзания почвы; k – коэффициент, который учитывает снижение водопроницаемости почвы, имеющей данную влажность, вследствие того, что почва промерзла и в порах появился лед. Величина Wl – показатель количества льда в порах почвы. Коэффициент A равен P_0 при $W=0$.

Ниже представлен график зависимости параметра P_0 от льдистости W и глубины промерзания l .

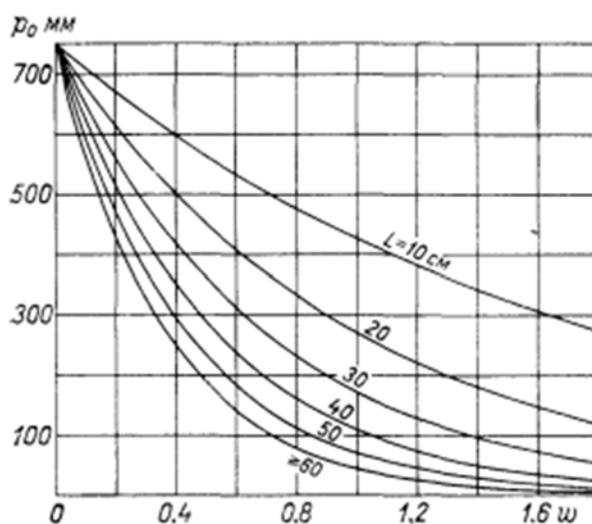


Рисунок 9 – график зависимости P_0 от W и l .

При использовании формулы (8) используется относительная величина запаса влаги в почве слоем 0-100 см, которая определяется по формуле

$$\frac{W_{\text{пр}}}{0,75W_{\text{нпв}}} \quad (10)$$

где $W_{\text{пр}}$ – количество продуктивной влаги в слое; $W_{\text{нпв}}$ – количество влаги при влажности разрыва капилляров.

Такое решение позволило объединить исходные данные по бассейнам, которые различаются по основным агрогидрологическим константам почвы. Так же, исходя из проведенных исследований, величина l ограничена 60 см, то есть все большие величины приравниваются к 60 см.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ПРОГНОЗА СТОКА ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ

Формулы, приведенные в предыдущей главе, применялись для расчета и прогноза стока весеннего половодья с бассейна р. Тихая Сосна – одного из правобережных притоков Верхнего Дона. Нужно пояснить, что расчетом стока половодья в данной работе называется операция по вычислению стока половодья, если в используемые при этом формулы подставляются известные (измеренные или рассчитанные к моменту вычислений) значения осадков за период весеннего половодья. Прогнозом стока половодья называется аналогичная операция, при которой неизвестные к моменту вычислений стока половодья осадки за период половодья заменяются их средними значениями за те годы, по данным за которые строится методика расчета.

Расчет стока (потерь) в указанном смысле дает возможность оценить меру соответствия применяемых зависимостей тем реальным процессам, для описания которых они предназначены.

Расчет (прогноз) стока половодья большой реки осуществляется по схеме «частный водосбор – замыкающий створ», т. е. вначале по предложенным формулам рассчитываются (прогнозируются) значения стока (y_i) для каждого частного водосбора, а затем рассчитывается (прогнозируется) сток в замыкающем створе ($y_{зам}$) по полученному уравнению множественной линейной регрессии вида

$$y_{зам} = a_1 * y_1 + a_2 * y_2 + \dots + a_n * y_n + b \quad (11)$$

Такая схема, например, использовалась Л. К. Вершининой для прогноза стока с бассейна р. Дон у станции Казанская (пл. водосбора 102000 км²), Вершининой было установлено, что одним из частных водосборов для этой цели может быть определенный бассейн р. Тихая Сосна до г. Алексеевки (пл. водосбора 2050 км²).

Исходные данные, используемые в работе, были собраны и обобщены в свое время сотрудниками ГГИ под руководством Л. К. Вершининой.

Весеннее половодье в бассейне р. Тихая Сосна, как правило, начинается во второй половине марта и продолжается, в зависимости от погодных условий и накопленных к концу зимы снегозапасов, три-четыре недели.

В качестве исходных данных использовались: запасы воды в снеге (снегозапасы), определенные на дату их максимальных значений (S), осадки от даты максимума снегозапасов до конца половодья (X), запасы влаги в метровом слое почвы (W), глубина промерзания почвы на начало половодья (l), сток за весеннее половодье за прошлые годы (Y) (таблица 1).

Таблица 1 – Исходные данные

Год	S , мм	X , мм	W , мм	l , см	Y , мм
1951	73	26	300	60	61
1952	74	20	305	57	59
1953	114	4	386	60	102
1954	58	17	280	60	6
1955	50	43	344	42	48
1956	107	16	266	60	49
1957	57	21	300	48	43
1958	46	70	254	60	31
1959	87	21	353	25	38
1960	53	33	330	60	65
1961	44	31	338	20	16
1962	14	15	306	35	8
1963	100	91	308	60	166
1964	115	48	312	60	97
1965	48	14	285	60	10
1966	52	88	335	12	30
1967	142	31	398	20	29
1968	163	14	302	27	90
1969	22	11	295	60	16
1970	144	46	308	20	62
1971	53	3	300	60	50
1972	28	1	286	60	10
1973	23	16	315	44	17
1974	40	17	310	60	30
1975	31	4	330	25	8
1976	60	26	250	60	10
1977	48	12	308	48	32
1978	34	21	321	48	36
1979	102	58	319	25	69

В общей сложности в распоряжении были исходные данные за период 1951-1979 гг. Было решено для определения значений параметров формул (6)-(7) использовать исходные данные за 24 года (1951-1974 гг.), а за 5 оставшихся лет (1975-1979 гг.) провести расчет (прогноз) стока половодья на так называемых независимых данных. Такого рода расчеты (прогнозы) стока половодья дают возможность получить представление о пригодности

полученных формул в будущем. В таблице 2 приведены средние значения, стандартные отклонения и коэффициенты вариации исходных данных за 1951-1974 гг.

Таблица 2 – Статистические характеристики исходных данных

	S	X	W	l	P	Y
Среднее	71,13	29,04	313,17	47,08	52,96	47,21
σ	41,43	24,47	33,58	17,16	37,28	37,56
Cv	0,58	0,84	0,11	0,36	0,70	0,80

Данные таблицы 2 показывают, что потери стока (P) и сток от величины подачи воды на водосбор ($S+X$) соответственно составляют 53% и 47%. Таким образом, средний коэффициент стока за половодье составляет 47%. Наиболее изменчивыми из определяющих факторов потерь стока являются снеготпасы и осадки. Особенно велика изменчивость осадков, поэтому замена их при прогнозе среднемноголетней величиной должна приводить к заметным погрешностям. Наименьшей изменчивостью из исходных данных обладают запасы влаги в почве.

В таблице 3 приводятся коэффициенты корреляции между элементами, приведенными в таблице 1.

Таблица 3 – Корреляция между исходными данными

	S	X	W	l	P	Y
S	1	0,23	0,27	-0,25	0,62	0,63
X		1	0,01	-0,24	0,46	0,44
W			1	-0,51	0,10	0,20
l				1	-0,57	0,14
P					1	-0,02
Y						1

Данные таблицы 3 показывают, что сток за половодье наиболее тесно связан со снегозапасами (0,63) и осадками (0,44). С влагозапасами в почве и глубиной промерзания сток связан слабо. Связь потерь стока со снегозапасами и осадками оценивается соответственно коэффициентами корреляции 0,62 и 0,46. Потери также заметно связаны с глубиной промерзания почвы (-0,57), т. е. чем больше глубина промерзания, тем меньше потери. Характер такой связи физически обоснован.

Расчет и прогноз стока весеннего половодья для бассейна р. Тихая Сосна в работе проводится как с применением формулы (6), так и с использованием формулы (7).

3.1 Расчет и прогноз стока половодья с применением формулы

$$P=P_0(1-e^{-S+X/P_0})$$

Сначала, решая графическим способом уравнение (6) относительно P_0 , определены значения P_0 для каждого года за период 1951-1974 гг. Таким же способом определяются значения P_0 для уравнения (7). Полученные величины P_0 представлены в таблице (4).

Таблица 4 – Значения P_0 , рассчитанные графическим способом для формул (6) и (7)

	P_0 (6)	P_0 (7)
1951	44	39
1952	47	36
1953	13	17
1954	59	146
1955	59	47
1956	72	82
1957	71	36
1958	86	107
1959	134	81
1960	29	22
1961	185	81
1962	113	27
1963	40	26
1964	37	68
1965	55	81
1966	276	151
1967	147	219
1968	161	91
1969	48	18
1970	208	151
1971	44	17
1972	54	22
1973	72	24
1974	38	28

Затем была установлена связь этих значений с переменными W' и $W'l$ согласно уравнению (11). При этом величины W' определялись как

$$W' = \frac{W - BЗ}{0,75 * НВ} \quad (12)$$

где W – влагозапасы в метровом слое почвы, $BЗ$ – влажность завядания, $НВ$ – наименьшая влагоемкость. Для метрового слоя почво-грунтов бассейна р. Тихая Сосна, согласно работе [3], $BЗ = 151$ мм, $НВ = 303$ мм.

Исследованиями В. Д. Комарова было установлено, что глубина промерзания почвы оказывает влияние на формирование потерь стока только в диапазоне 0-60 см. Дальнейшее увеличение глубины не приводит к уменьшению потерь, они остаются такими же, как были бы при $l = 60$ см. Поэтому значения l более 60 см рекомендовано принимать равными 60 см.

Значения W' и $W'l$ с исправленной глубиной промерзания приводятся в таблице (5).

Таблица 5 – Исправленные значения

Год	W'	$W'l$
1951	0,66	39,34
1952	0,68	38,63
1953	1,03	62,05
1954	0,57	34,06
1955	0,85	35,67
1956	0,51	30,36
1957	0,66	31,47
1958	0,45	27,19
1959	0,89	22,22
1960	0,79	47,26
1961	0,82	16,46
1962	0,68	23,87
1963	0,69	41,45
1964	0,71	42,51
1965	0,59	35,38
1966	0,81	9,72
1967	1,09	21,74
1968	0,66	17,94
1969	0,63	38,02
1970	0,69	13,82
1971	0,66	39,34
1972	0,59	35,64
1973	0,72	31,75
1974	0,70	41,98

Для определения значений параметров в уравнении вида (11) это уравнение логарифмировалось

$$\ln P_0 = \ln A - aW' - bW'l, \quad (13)$$

т. е. превращалось в линейное уравнение относительно переменных $\ln P_0$, W' , $W'l$. Затем с помощью функции «линейн» программы *Excel* были определены значения $\ln A = 5,94$; $a = 0,326$; $b = -0,06$. При этом погрешность определения этих параметров составила соответственно 0,88, 1,07, 0,013.

Получилось, что погрешность определения коэффициента a примерно в 3 раза больше его значения, т. е. недопустимо большая. Поэтому было принято решение отказаться от использования W' и для определения P_0 использовать только переменную $W'l$.

Повторное применение функции «линейн» привело к результатам $\ln A = 5,94$, $b = -0,06$, т. е. для расчета P_0 было получено уравнение

$$P_0 = 478e^{-0,06W'l}, \quad (14)$$

которое и использовалось далее.

Результаты расчета стока половодья на зависимых данных, т. е. за 1951-1974 гг. приведены в таблицах (6-7).

Таблица 6 – Расчет стока половодья на зависимых данных

Год	P_0	$P_{рас}$	$Y_{рас}$	$\Delta Y_{рас}$	ΔY^2
1951	44	40	59	-2	3
1952	47	40	54	-5	30
1953	13	13	105	3	10
1954	59	43	32	26	700
1955	59	47	46	-2	3
1956	72	59	64	15	219
1957	71	47	31	-12	154
1958	86	64	52	21	452
1959	134	74	34	-4	17
1960	29	27	59	-6	41
1961	185	62	13	-3	7
1962	113	26	3	-5	21
1963	40	39	152	-14	203
1964	37	37	126	29	848
1965	55	37	25	15	218
1966	276	110	30	0	0
1967	147	102	71	42	1791
1968	161	107	70	-20	413
1969	48	24	9	-7	47
1970	208	125	65	3	12
1971	44	32	24	-26	667
1972	54	22	7	-3	12
1973	72	30	9	-8	65
1974	38	30	27	-3	7

Таблица 7 –Прогноз стока половодья на зависимых данных

Годы	P_0	$P_{\text{прог}}$	$Y_{\text{прог}}$	$\Delta Y_{\text{прог}}$	ΔY^2
1951	44	40	62	1	1
1952	47	42	61	2	6
1953	13	13	130	28	792
1954	59	46	41	35	1253
1955	59	44	35	-13	157
1956	72	61	75	26	656
1957	71	50	36	-7	48
1958	86	50	25	-6	37
1959	134	78	38	0	0
1960	29	27	55	-10	103
1961	185	60	13	-3	11
1962	113	36	7	-1	1
1963	40	38	91	-75	5634
1964	37	37	107	10	109
1965	55	41	36	26	651
1966	276	70	11	-19	369
1967	147	101	70	41	1676
1968	161	112	80	-10	102
1969	48	31	20	4	13
1970	208	117	56	-6	41
1971	44	37	45	-5	29
1972	54	35	22	12	137
1973	72	37	15	-2	4
1974	38	32	37	7	48

Средняя квадратическая погрешность расчета стока составила 16 мм ($\delta_{\text{рас}} = 16$ мм). При стандартном отклонении стока (σ) равном 38 мм, отношение δ/σ составило 0,42 ($\delta/\sigma = 0,42$), допустимая погрешность расчета ($\delta_{\text{доп}}$) равна в данном случае $\delta_{\text{доп}} = 0,674\delta = 26$ мм. Расчет стока весеннего половодья за 24 года показал, что только за два половодья величина δ превосходила величину $\delta_{\text{доп}}$, т. е. оправдываемость расчета составила 92%.

Таким образом, можно сказать, что применяемая методика дает удовлетворительные результаты при расчете стока половодья на зависимом материале.

При прогнозах стока половодья за 1951-1974 гг. использовались те же формулы, что и при расчете, но вместо фактических осадков за каждое половодье подставлялось их среднее многолетнее значение $X_{cp} = 29$ мм.

При прогнозе стока половодья по зависимым данным средняя квадратическая погрешность составила 22 мм и $\delta/\sigma = 0,58$. Обеспеченность прогноза составила 83%. Такие оценки прогноза следует считать удовлетворительными.

Далее был произведен расчет стока и дан прогноз на независимых данных за 1975-1979 гг. Результаты расчета и прогноза приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты расчета и прогноза стока за весенние половодья по независимым данным

	Расчет стока			Прогноз стока		
	$Y_{рас}$	$Y_{изм}$	$\Delta Y_{рас}$	$Y_{прог}$	$Y_{изм}$	$\Delta Y_{прог}$
1975	4	8	-4	11	8	3
1976	28	10	18	30	10	20
1977	21	32	-11	32	32	0
1978	20	36	-16	36	36	-11
1979	59	69	-10	69	69	-27

Данные таблицы показывают, что при расчете стока за 5 лет на независимых данных не было допущено ни одной ошибки, превышающей допустимую, равную 26 мм. При прогнозе стока за те же годы половодий была допущена только одна погрешность (1979), превышающая допустимую только на 1 мм.

Отсюда можно сделать вывод о том, что методика прогноза стока с применением уравнения (6) для определения потерь может использоваться для прогноза стока весеннего половодья с водосбора р. Тихая Сосна.

3.2 Расчет и прогноз стока весеннего половодья с применением формулы $P=P_0th(S+X/P_0)$

Сначала определялось значение P_0 (таблица 4). Погрешность определения коэффициента a , входящего в уравнение (11) так же, как и в предыдущем способе, оказалось недопустимо большой. Поэтому и здесь решено отказаться от использования переменной W' , в результате чего было получено уравнение для расчета параметра P_0 :

$$P_0 = 228e^{-0,047W'l} \quad (15)$$

Результаты расчета и прогноза стока за половодье на зависимых данных приведены в таблицах 9-10.

Таблица 9 – Расчет стока половодья на зависимых данных

Годы	P_0th	$P_{рас}$	$Y_{рас}$	$\Delta Y_{рас}$	ΔY^2
1951	36	36	63	2	6
1952	37	37	57	-2	3
1953	12	12	106	4	13
1954	46	43	32	26	697
1955	43	42	51	3	12
1956	55	54	69	20	420
1957	52	47	31	-12	145
1958	64	60	56	25	610
1959	80	70	38	0	0
1960	25	25	61	-4	14
1961	105	64	11	-5	30
1962	74	28	1	-7	44
1963	32	32	159	-7	56
1964	31	31	132	35	1231
1965	43	39	23	13	180
1966	144	108	32	2	4
1967	82	80	93	64	4136
1968	98	93	84	-6	35
1969	38	27	6	-10	93
1970	119	110	80	18	336
1971	36	33	23	-27	721
1972	43	25	4	-6	39
1973	51	33	6	-11	119
1974	32	30	27	-3	9

Таблица 10 – Прогноз стока половодья на зависимых данных

Годы	P_{0th}	$P_{\text{прог}}$	$Y_{\text{прог}}$	$\Delta Y_{\text{прог}}$	ΔY^2
1951	36	36	66	5	29
1952	37	37	66	7	52
1953	12	12	131	29	821
1954	46	44	43	37	1373
1955	43	41	38	-10	92
1956	55	54	82	33	1091
1957	52	48	38	-5	28
1958	64	53	22	-9	73
1959	80	72	44	6	38
1960	25	25	57	-8	59
1961	105	63	10	-6	38
1962	74	39	4	-4	14
1963	32	32	97	-69	4826
1964	31	31	113	16	259
1965	43	41	36	26	684
1966	144	73	8	-22	504
1967	82	80	91	62	3897
1968	98	94	98	8	60
1969	38	33	18	2	3
1970	119	107	66	4	18
1971	36	35	47	-3	10
1972	43	37	20	10	97
1973	51	39	13	-4	19
1974	32	31	38	8	66

Средняя квадратическая погрешность расчета стока половодья составила 19 мм, $\delta/\sigma = 0,50$. Обеспеченность метода расчета 92%. Средняя квадратическая погрешность прогноза стока половодья равна 24 мм, $\delta/\sigma = 0,63$. Обеспеченность прогноза составила 79%.

Далее также был произведен расчет стока и дан прогноз на независимых данных за 1975-1979 гг. Результаты расчета и прогноза приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты расчета и прогноза стока за весенние половодья по независимым данным

	Расчет стока			Прогноз стока		
	$Y_{рас}$	$Y_{изм}$	$\Delta Y_{рас}$	$Y_{прог}$	$Y_{изм}$	$\Delta Y_{прог}$
1975	2	8	-6	7	8	-1
1976	29	10	19	31	10	21
1977	19	32	-13	33	32	1
1978	19	36	-17	25	36	-11
1979	71	69	2	47	69	-22

Данные таблицы показывают, что результаты как расчета, так и прогноза стока за 5 лет удовлетворительны.

Подводя итоги, можно сказать, что при прогнозе стока весеннего половодья с бассейна р. Тихая Сосна у г. Алексеевки для определения потерь могут быть использованы формулы (6) и (7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной дипломной работе были использованы два уравнения для расчета и прогноза стока весеннего половодья на реке Тихая Сосна.

Результаты расчетов и прогнозов стока половодья на зависимых данных за 1951-1974 годы следует считать удовлетворительными для обоих уравнений.

При расчете стока по уравнению (6) средняя квадратическая погрешность составила 16 мм, а по уравнению (7) – 19 мм. Отношение δ/σ составило 0,42 и 0,50. Оправдываемость расчетов составила 92% в обоих случаях.

Прогнозы стока по зависимым данным так же стоит считать удовлетворительными в обоих случаях. При использовании уравнения (14) средняя квадратическая погрешность составила 22 мм и $\delta/\sigma = 0,58$. Обеспеченность прогноза составила 83%. Применяя формулу (15) мы получили следующие результаты: средняя квадратическая погрешность прогноза стока половодья равна 24 мм, $\delta/\sigma = 0,63$. Обеспеченность прогноза составила 79%. Таким образом, использование уравнения (6) дает более точные результаты, однако и формула (7) может быть использована для расчета и прогноза стока половодья.

Также для оценки пригодности уравнений были произведены поверочные расчеты и прогнозы за 1975-1980 годы. Результаты этих вычислений также оказались удовлетворительными.

Подводя итог, можно сказать, что указанные выше уравнения могут быть использованы для расчета и прогноза стока весеннего половодья на р. Тихая Сосна.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Апполов Б. А., Г. П. Калинин, В. Д. Комаров. Курс гидрологических прогнозов. Ленинград, Гидрометеиздат, 1974.
2. Быстров А.В. Расчет и прогноз потерь талых вод на водосборах левобережной части Нижнего Дона. Труды ГГИ, 1980, вып.265, с.83-87.
3. Вершинина Л. К. Анализ зависимости объема весеннего стока рек бассейна р. Дона от обуславливающих факторов. Труды ГГИ, 1974, вып.218, с.45-71.
4. Вершинина Л. К. Методика расчета и прогноза объема стока весеннего половодья в бассейне р. Дона. Труды ГГИ, 1977. вып.233. с.52-65.
5. Вершинина Л. К., Крестовский О.И. Учет водопоглотительной способности водосборов при прогнозах стока весеннего половодья. Труды ГГИ, 1980, вып.265, с.3-31.
6. Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы - СПб., изд. РГГМУ, 2007
7. Добровольский А. Д., Добролюбов С.А., Михайлов В.Н.. Гидрология. Учебник для вузов – Москва, Высшая школа, 2007.
8. Постников А.Н. Упрощенная модель расчета и стока весеннего половодья в лесостепной и степной зонах СССР (на примере р. Дона). Сборник работ по гидрологии № 19, Ленинград, Гидрометеиздат, 1987, с. 172-188.
9. Протасьев М. С. Ресурсы поверхностных вод СССР Том 7 Донской район. – Ленинград, Гидрометеиздат, 1973