



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 стока весеннего половодья на малых и
средних реках лесной зоны**

Исполнитель

Кошевой Александр Олегович

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

доцент, кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Постников Александр Николаевич

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

доцент, кандидат технических наук

(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«16» 06 2025

Санкт-Петербург

2025

Содержание

Стр.

Введение-----	3
1. Уравнения водного баланса бассейна за период начало снеготаяния – окончание половодья и за период снеготаяния-----	5
2. Свойства потерь и методы прогноза стока весеннего половодья в лесной зоне	
2.1 Краткие физико-географические сведения о бассейне реки Вятки-----	14
2.2 Районирование равнинной части ЕТС по условиям формирования потерь талых вод -----	17
2.3 Распределение стока весеннего половодья и обуславливающих его факторов по территории бассейна -----	30
2.4 Предложения по дифференцированному расчету и прогнозу составляющих потерь весенних вод -----	36
3. Расчет и прогноз стока весеннего половодья -----	44
Заключение -----	53
Список использованных источников-----	55

Введение

Весеннее половодье - самая характерная и очень важная с точки зрения хозяйственного использования воздушных ресурсов страны особенность режима равнинных рек России. А.И.Воейков писал: - «Нигде явление снежного покрова так не велико, как в России, так как нигде нет равнины столь обширной, отдаленной от морей, покрытой снегом зимой... Мы слишком привыкли к половодью своих рек, чтобы оценить его значение, а это, несомненно, явление величественное по своим размерам, по своей правильности и влиянию на народную жизнь» [2].

На небольших и средних по размеру реках половодье продолжается относительно короткое время: 10-15 дней, когда бассейн практически безлесный, и 25-40 дней, когда в значительной степени покрыт лесом. На больших реках половодье продолжается значительно дольше, так как только добегание талых вод от верховьев длиться 20-30 дней. Несмотря на относительно небольшую продолжительность половодья, сток за время его прохождения составляет в среднем 50-70 % годового, а на реках зоны недостаточного увлажнения (Заволжье, Казахстан и др.) - до 90-95%. Во время половодья уровень воды повышается обычно на несколько метров и, как правило, является самым высоким за весь год.

В отдельные годы снег на равнине тает очень бурно. Если при этом снежный покров бывает мощным, а мерзлая почва — слабо водопроницаемой и если к тому же выпадают дожди, то весной реки сильно разливаются, создавая I наводнения и нанося огромный ущерб народному хозяйству {2}.

Из сказанного уже видно, какое большое практическое значение имели и имеют прогнозы половодья. Однако, следует отметить, что роль этих прогнозов еще больше увеличивается в связи с созданием на реках водохранилищ, крупных ГЭС, работающих в единой энергетической системе. Научно обоснованные прогнозы половодья позволяют значительно эффективнее

использовать водохранилища, правильнее регулировать с их помощью сток и заблаговременно принимать меры по защите сооружений и населенных пунктов.

В настоящее время основными долгосрочными прогнозами половодья являются прогнозы общей величины стока за время его прохождения, максимального расхода и уровня воды и срока его наступления, а также прогнозы стока за период спада половодья.

Методической основой долгосрочных прогнозов стока за период половодья служат эмпирически устанавливаемые для каждой реки воднобалансовые зависимости весеннего стока от запаса воды в снежном покрове перед началом снеготаяния, последующих осадков и характеристик водопоглотительной способности бассейна в конце зимы. Для нахождения такой зависимости нужно располагать по данному бассейну материалами соответствующих гидрологических и метеорологических наблюдений не менее чем за 18-20 лет [13].

Прогноз стока половодья большой реки, как правило, осуществляется на основе прогноза стока половодья с частных бассейнов, т.е. с бассейнов отдельных ее притоков. При таком способе прогноза все физические закономерности формирования стока половодья рассматриваются и учитываются для территорий частных бассейнов. Можно сказать, что разработка методики прогноза половодья на большой реке заключается, в основном, в разработке методики прогноза стока для частных бассейнов. Сток в избранном створе на большой реке осуществляется по уравнению множественной линейной регрессии, предикторами которого является стоки с частных бассейнов.

Разработке методики прогноза стока за половодья небольшой реки в лесной зоне (притока Вятки) и посвящается настоящая работа.

1. Уравнение водного баланса бассейна за период начало снеготаяния – окончание половодья и за период снеготаяния

Теоретической основой всех существующих методов прогноза объема стока с речного бассейна за период весеннего половодья служит уравнение водного баланса бассейна за период половодья.

Уравнение водного баланса бассейна за период начало снеготаяния — окончание половодья запишем в виде

$$y_T + y_d = s + x_1 + x_2 - E_C - E_n \pm \Delta W_n \pm \Delta W_{пз} - y_{пз} \quad (1.1)$$

Где y_T - поверхностный сток талых вод и от дождей (x_1), выпавших на тающий снежный покров;

y_d - поверхностный сток от дождей (x_2), выпавших на участки бассейна, освободившиеся от снега;

s - запас воды в снежном покрове (и в ледяной корке на поверхности почвы) перед началом снеготаяния;

E_C - испарение с поверхности снежного покрова за время снеготаяния;

E_n - испарение с поверхности почвы и транспирация (суммарное испарение);

ΔW_n — изменение запаса воды во всей зоне аэрации, включая почву, знак минус перед ΔW_n означает увеличение этого запаса, плюс — уменьшение;

$\Delta W_{пз}$ - изменение запаса воды в водоносных горизонтах (изменение запаса подземных вод), знак минус и плюс перед $\Delta W_{пз}$ имеют тот же смысл, что и перед ΔW_n ; $y_{пз}$ - подземный сток.

Уравнение (1) относится и к периоду половодья, когда его начало совпадает с началом снеготаяния. Но то же самое, в общем, можем сказать и в отношении лет, когда эти сроки заметно расходятся, потому что начало снеготаяния - начало половодья совсем мал по сравнению с другими

составляющими водного баланса в уравнении (1)

Уравнение (1) выражает водный баланс приближенно. Однако неучтенные в нем составляющие баланса, к которым относятся испарение с водной поверхности, изменение запаса воды в руслах рек и озерах и некоторые другие, обычно незначительны относительно учтенных. Следовательно, эта неполнота уравнения не имеет существенного значения. Отметим также, что уравнение справедливо для бассейнов, в которых наземный и подземный водоразделы практически совпадают; это, как известно, бывает почти всегда, исключая бассейны малых рек.

В записанном виде рассматриваемое уравнение не вполне удобно для выяснения того, какие из факторов, влияющих на сток талых вод, следует считать основными. Поэтому запишем уравнение в другом виде. Но перед этим обратим внимание на следующее обстоятельство.

Испарение с поверхности почвы и тем более транспирация, которая нередко начинается раньше окончания половодья в замыкающем створе, происходят в основном за счет воды, находящейся ниже поверхности почвы. Теперь допустим, что вся эта вода если и могла бы попасть в реку, то лишь после принимаемого времени окончания половодья.

Тогда сумма $(E_{\text{п}} \pm \Delta W_{\text{п}} \pm \Delta W_{\text{пз}} - y_{\text{пз}})$ может рассматриваться как величина инфильтрации талых и дождевых вод, обозначенных в уравнении (1) через s , x_1 и x_2 (здесь знак плюс перед ΔW уже означает увеличение запаса воды). Рассуждая таким образом, мы очевидно, считаем, что вода, находящаяся ко времени завершения снеготаяния в различного рода бессточных углублениях и, в основной своей массе очень быстро впитывается почвой и поэтому как бы входит в величину инфильтрации. Как увидим несколько ниже, такое рассуждение справедливо в отношении многих, но не всех бассейнов.

Теперь уравнение (1) можем записать в виде

$$y_{\text{Т}} + y_{\text{Д}} = s + x_1 + x_2 - E_{\text{с}} - I, \quad (1.2)$$

где I - инфильтрация талых и дождевых вод.

Если же вместо периода половодья будем рассматривать период снеготаяния, то придем к уравнению

$$\dot{y}_T = s + x_1 - E_c - I_T - u - (W_p - \dot{W}_p) \quad (1.3)$$

где \dot{y}_T - поверхностный сток в замыкающем створе с начала половодья до дня завершения снеготаяния;

I_T - инфильтрация за время снеготаяния;

u и W_p количество воды соответственно на поверхности бассейна и в русловой сети при завершении снеготаяния;

\dot{W}_p - количество воды в русловой сети в момент окончания половодья (остальные обозначения прежние).

Понятно, что $(\dot{y}_T + W_p - \dot{W}_p) \approx y_T$ и следовательно,

$$\dot{y}_T = s + x_1 - E_c - I_T - u, \quad (1.4)$$

В отношении величины испарения с поверхности снежного покрова, входящей в уравнения (1) — (4), отметим лишь, что она весьма невелика, обычно не превышает 7-10 мм.

Для лесной зоны уже не всегда можно считать, что на испарение с поверхности бассейна в основном расходуется только вода, проникшая в почву, и что эта вода если и достигает замыкающего створа, то только после окончания половодья, это объясняется рядом обстоятельств, из которых отметим главные. В лесной зоне преобладают подзолистые почвы, которые характеризуются быстрым уменьшением водопроницаемости с глубиной и существованием на глубине 40-60 см уплотненного иллювиального слоя В1. Весной над этим слоем образуется временный водоносный горизонт — верховодка, которая при благоприятных условиях принимает участие в питании

рек еще в период половодья. Далее, в этой зоне, в общем, неглубоко зал причем их уровень часто довольно быстро повышается как только начинается инфильтрация талых и дождевых вод и понижается по прекращении ее. В разных понижениях и просто в низких местах бассейна весной уровень грунтовых вод и тем более капиллярная кайма, всегда имеющаяся над ним, обычно на какое-то время выходит на поверхность. Ясно, что такой характер колебаний уровня грунтовых вод говорит о том, что их запас пополняется за счет инфильтрации талых вод и это пополнение частично расходуется на питание реки еще в период половодья. Значит, рассматриваемое питание реки является снеговым.

Чтобы полнее и отчетливее представить себе важные особенности механизма стока в лесной зоне выделим такие следующие случаи этого стока (для простоты пока будем считать, что поверхностного задержания воды нет).

- Интенсивность поступления воды на поверхность h меньше интенсивности инфильтрации i . Естественно, в этом случае никакого стока не может быть. Но как только общее количество впитавшейся воды I превысит величину $W_{\text{нпв}} - W$ в некотором слое над относительным водоупором, например над слоем B_1 или над уровнем достаточно высоко стоящих грунтовых вод, начинается существенное поступление в реку внутрипочвенного (подпочвенного) стока или существенно усилится грунтовый сток; $W_{\text{нпв}}$ - наименьшая полевая влагемкость в слое дренирования, содержащем талые воды, только что проникшие в почву, W — начальный запас влаги в этом слое. Напомним, что под наименьшей полевой влагемкостью понимается наибольшее количество воды, удерживаемое почвой в естественных условиях над зоной капиллярного поднятия, имеющейся над уровнем грунтовых вод.

- При $h > i$ и наличии дефицита влаги, равного вышеуказанной величине $W_{\text{нпв}} - W$, поверхностный склоновый сток возникает сразу, несмотря на этот дефицит, а подземное питание продолжает осуществляться за счет запасов грунтовых вод, имевшихся до начала таяния. Но спустя некоторое

время, когда дефицит исчезнет вследствие инфильтрации, т.е. влажность почвы превысит $W_{\text{нпв}}$, появится внутрипочвенный сток или усилится подземное питание.

В лесной зоне существенную часть бассейна нередко занимают болота. Весной они обычно переполняются водой, которая частично расходуется на сток тоже еще в период половодья.

Из всего сказанного следует, что в лесной зоне колебания от года к году величины испарения с поверхности бассейна за время от схода снега до окончания половодья могут заметно повлиять на величину весеннего стока. Значит, метеорологические факторы, от которых зависит испарение, могут быть существенными факторами этого стока. Однако расчеты питания рек лесной зоны за период половодья и весь опыт разработки методов долгосрочных прогнозов весеннего стока этих рек говорят о том, что колебания величины $E_{\text{п}}$ от года к году обычно все же мало сказываются на общей величине стока за период половодья.

Итак, в лесной зоне на поглощение талых вод речным бассейном влияют факторы инфильтрации и факторы, определяющие свободную к началу снеготаяния емкость бессточных углублений на поверхности бассейна. К этой емкости вполне можно прибавить влагоемкость лесной подстилки, а также мохового покрова, в сумме составляющую до 20-30 мм. В бассейнах, где существенная часть талых вод достигает реки подземными путями еще во время половодья, к этим факторам добавляются факторы, определяющие водоудерживающую способность тех почво-грунтов, которые становятся дренируемыми вскоре после начала таяния. Это, прежде всего бассейны, где преобладают песчаные и супесчаные почвы на песках, и сильно заболоченные бассейны. Ясно, что в таких случаях для анализа факторов, влияющих на поглощение воды бассейном, удобнее уравнение (1). Отметим, что за количественную характеристику водоудерживающей способности почво-грунтов бассейна может быть принята разность наименьшей полевой влагоемкости и наличного запаса влаги в расчетном слое почвы.

Сравнивая сухостепную, степную и лесостепную зоны, с одной стороны, и лесную - с другой, можно сказать, что в первых трех зонах, исключая отдельные районы, поглощение воды речными бассейнами в основном определяется степенью водопроницаемости почвы, т.е. факторами инфильтрации; в лесной же зоне оно уже нередко в основном зависит не от того, сколько воды уйдет в почву, а от того, сколько из этой воды бассейн задержит в почво-грунтах, во всяком случае до окончания половодья. В лесной зоне довольно часто большое количество воды — до 30-50 мм - расходуется также на заполнение различного ряда бессточных углублений на поверхности бассейна и насыщение водой лесной подстилки и мохового покрова. При этом важно то, что это количество заметно меняется от года к году в зависимости от степени влагонасыщенности бассейна перед началом снеготаяния.

Уравнения водного баланса (1) — (4) и количественная характеристика составляющих этого баланса, основывающаяся на материалах наблюдений и расчетов, позволяют не только сказать, какие из факторов в основном влияют на сток за период половодья. Чтобы яснее себе это представить, допустим, что нам известны аналитические выражения зависимостей каждой из составляющих водного баланса, состоящей в правой части уравнения, от обуславливающих факторов. Тогда, подставив эти выражения в уравнение водного баланса, получим аналитическое выражение самой зависимости стока за период половодья от влияющих на него факторов. Отсюда видно, что уравнение водного баланса половодья за период половодья является общей теоретической основой для разработки методов расчета и прогноза весеннего стока.

Дождевой сток в период половодья, величина которого была обозначена U_d , усложняет анализ процесса весеннего стока, а следовательно, и разработку методов его прогнозов. Условия дождевого стока существенно отличаются от условий стока талых вод. Отметим лишь следующее. На поглощение дождевых вод уже может заметно влиять потеря воды бассейном вследствие испарения с почвы в предыдущие дни. И далее, когда дождевой сток U_d значителен, то

точность долгосрочных прогнозов весеннего стока понижается, даже если мы можем рассчитать без существенных погрешностей его величину по данным о фактически выпавших осадках. Понижение объясняется ошибками прогноза самих осадков, если мы им пользуемся, или той неточностью, которую мы допускаем, если будем принимать количество будущих осадков равным средней их величине, т.е. будем принимать $x = \bar{x}$.

Под потерями талых вод p принято принимать

$$p = s + x_1 - (y - u_d - u_{пз}) = s + x_1 - u_t, \quad (1.5)$$

Где y — общий сток за период половодья;

u_t - сток талых вод по поверхности и подземными путями.

Учитывая сказанное об особенностях механизма стока талых вод в лесных бассейнах, здесь под величиной $u_{пз}$ в общем случае необходимо понимать только тот подземный сток, который не обусловлен талыми водами, поступившими на поверхность бассейна в течение весны данного года, т.е. базисный (устойчивый) подземный сток. В практических расчетах величина u_d обычно определяется путем срезки дождевого паводка на гидрографе с помощью так называемой типовой кривой спада половодья (рис. 1).

Можно найти величину u_d и по данным о расходах воды малых рек. На гидрографах этих рек дождевые паводки после схода снега выделяются совершенно отчетливо и определение их границ не вызывает трудностей.

Нередко вместо потерь, определяемых по выражению (5), вычисляется и рассматривается потеря

$$\dot{p} = s + x_1 + x_2 - (y - u_{пз}) \quad (1.7)$$

Эта величина состоит из потерь талых вод и потерь дождевых вод; количество последних равно x_2 .

Поскольку, как отмечалось, условия потерь талых и дождевых вод весьма

различны, то при установлении по данным гидрологических и метеорологических наблюдений зависимостей величины этих потерь от обуславливающих их факторов, понятно, возникают значительные дополнительные трудности.

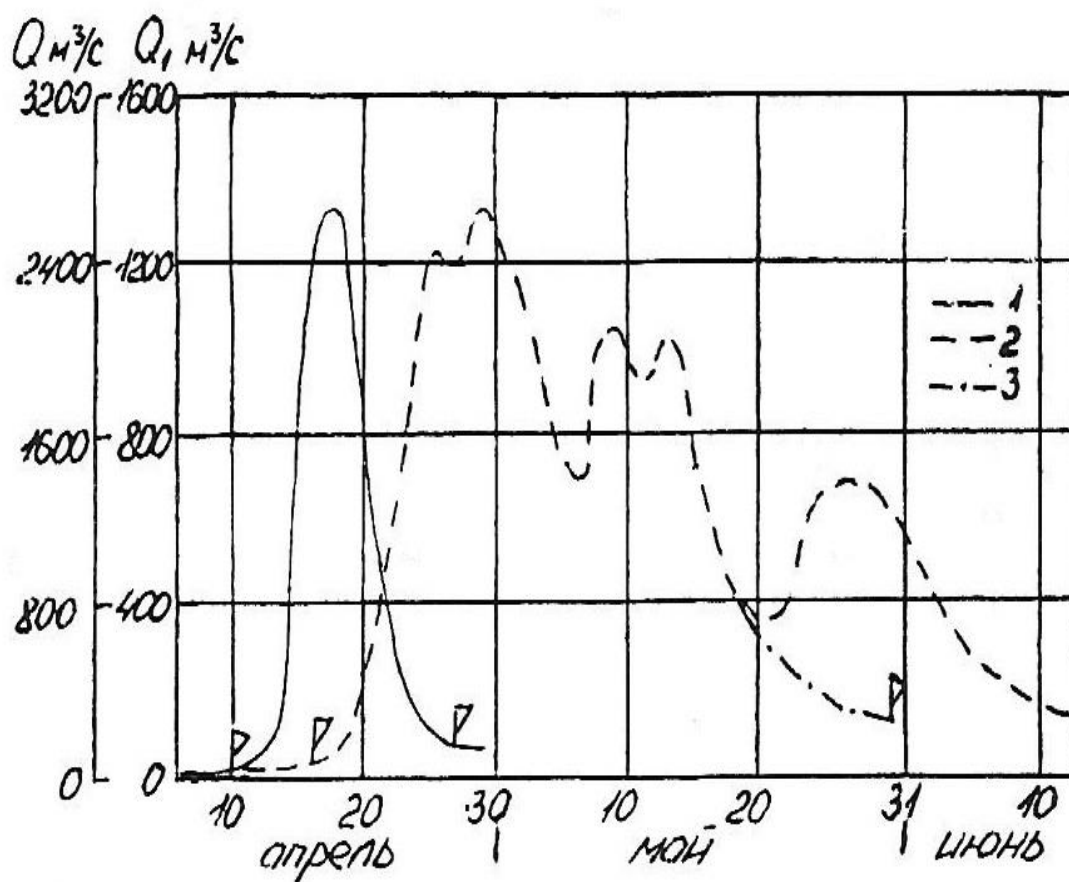
Переписав уравнение водного баланса (5) в виде

$$y_T = s + x_1 - p, \quad (1.6)$$

приходим к выводу, что прогноз стока талых вод сводится к прогнозу потерь этих вод, так как величины s и x_1 всегда бывают заданы. Значение s вычисляется по данным снегомерных съемок. Значение x_1 за прошлые годы определяется на основе данных наблюдений метеорологических станций, а для весны, на которую дается долгосрочный прогноз стока, - на основе прогноза погоды или принимается, что $x_1 = \bar{x}_1$. Следовательно, практическая возможность долгосрочного прогноза талого стока воды в основном определяется возможностью заблаговременного (до начала таяния) количественно оценить водопоглотительную способность бассейна. Чем точнее эта оценка, тем точнее прогноз при прочих равных условиях. Заблаговременность прогноза определяется временем от даты его выпуска до начала таяния снега и продолжительностью половодья.

Согласно уравнению (6), прогноз общей величины стока за период половодья, по существу, сводится к прогнозу как потерь талых вод, так и потерь дождевых вод.

Рисунок 1.1- Гидрографы рек с отмеченными на них деталями начала и окончания половодья



1 – р.Сосна – г.Елец, площадь бассейна 16300 км кв, 1963г.;

2 – р.Юг – пгт. Подосиновец, площадь бассейна 15200 км кв, 1955 г.;

3 – типовая кривая спад

2. Свойства потерь и методы прогноза стока весеннего половодья в лесной зоне

В настоящей главе рассматриваются свойства и механизмы формирования потерь талого стока.

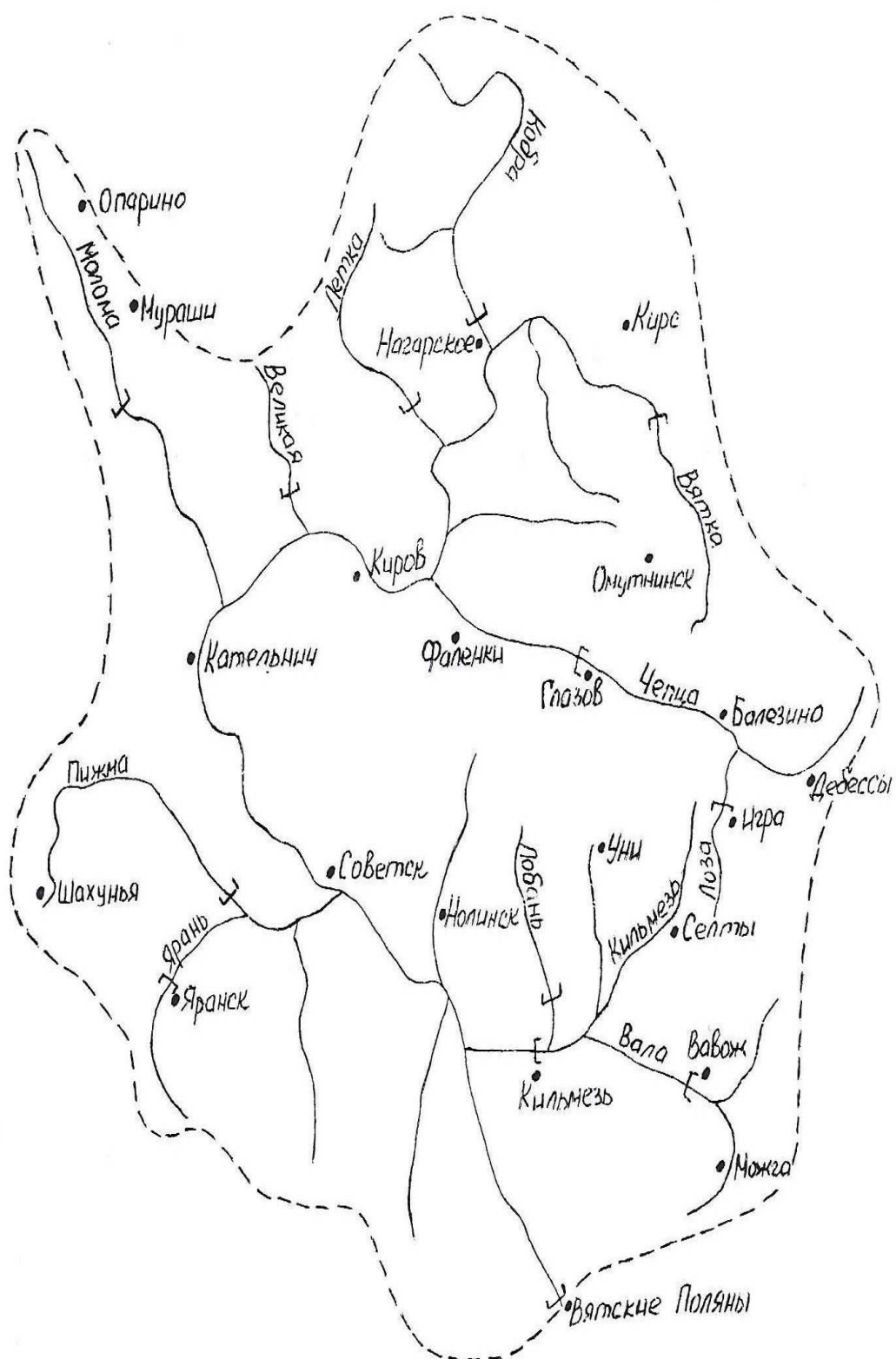
Объектом исследования был избран бассейн р. Вятки до г. Вятские Поляны площадью 124 тыс. км кв. (рис. 2) О. И. Крестовский считает, что водосбор р. Вятки по своим физико-географическим характеристикам типичен для значительной части равнинной территории Камско-Волжского и Северодвинского бассейнов [2] Таким образом, полученные выводы могут носить не локальный характер, а быть достаточно общим и по крайней мере, для лесной зоны северной и северо-восточной части ЕТС.

2.1 Краткие физико-географические сведения о бассейне р. Вятки

Рельеф бассейна представляет собой всхолмленную равнину с хорошо развитой гидрографической сетью и перепадами высот до 100 м. Преобладающие уклоны склонов составляют 20-40 %. Наиболее ровной является юго-западная часть, пересекаемая р. Пижмой (приток р. Вятки), где перепады высот составляют около 50 м.

Данные работ [3,4] показывают, что водосбор Вятки характеризуется большим разнообразием почв по механическому составу и вследствие этого значительной изменчивостью их водопроницаемости по площади водосбора. В северной его части (севернее г. Кирова и р. Чепцы) преобладают почвы дерново-средне- и сильно-подзолистые на суглинках, со слабой водопроницаемостью, которая сравнительно мало изменяется по территории. Средняя и южная части заняты в основном подзолистыми почвами, по механическому составу варьирующими от песков до тяжелых суглинков и обладающих значительной пестротой по водопроницаемости. Амплитуда колебаний коэффициентов фильтрации здесь достигает трех порядков.

Рисунок 2.1- Схема бассейна р.Вятки до г. Вятские Поляны



Кроме названных типов почв в бассейне имеются болотные и аллювиальные луговые. Распространение их незначительно.

О. И. Крестовский [2] в генерализованном виде почвенную карту-схему территории представляет в следующем виде: «почвы водосбора средне- и сильно-подзолистые на покровах суглинках и супесях. Суглинки занимают около 50 % площади, супеси - 30 %, пески - 10 %, торфяные почво-грунты 10 %. Заболоченность территории 2-10 %.»

Дерново-подзолистые почвы имеют резко выраженное деление на генетические горизонты: сверху (до 10-20 см) расположен рыхлый перегнойно-аккумулятивный (A1), затем до глубины 20-35 см — слой подзола (A2) и ниже до глубины 50-100 см - уплотненный аллювиальный горизонт (B). При этом наблюдается быстрое уменьшение водопроницаемости по глубине, обусловленное снижением пористости и количества крупных пор: горизонт A1 имеет пористость в среднем около 50 %, A2 — 40-45 % и B — 30-35 %. Горизонт B, обычно представленный суглинками и глинами, во влажном и промерзшем состоянии обладает очень незначительной водопроницаемостью и может служить водоупором, над которым часто образуется верховодка.

Грунтовые воды примерно на 25 % площади водосбора залегают на глубине 0,5-1,0 м. К таким участкам относятся низкие части склонов, тальвеги почв и поймы рек. На остальной части водосбора грунтовые воды первого водоносного горизонта залегают в теплые периоды на глубине 1,5-3,0 м, а на некоторых участках, особенно на юге бассейна, до 5-10 м. В периоды обильного увлажнения почв на многих участках образуется верховодка, что весьма характерно для условий лесной зоны. [5]

Залесенность бассейна составляет около 50 % и изменяется в разных районах от 80-90 % до 20 %. В северных районах (залесенность 80-90 %). Преобладающими являются хвойные породы. В центральных и южных районах наблюдается большое разнообразие типов лесов: еловые и елово-осиновые на суглинках, сосновые на песках, сосново-еловые на супесях и смешанные вид леса, произрастающие на суглинках и супесях. Залесенность центрального

района 30-70 %, наибольшее распространение имеют степные виды леса с преобладанием хвойных пород. В южной части водосбора р. Вятки, где залесенность составляет 20-50 %, распространены сильно разреженные смешанные леса с преобладанием ели и сосны, с подлеском из сосны, березы, клена, дуба и липы[6, 2]. Наиболее заболоченными являются водосборы рек Моломы (30 %), Быстрицы (30 %) и Пижмы (15-20 %). На остальной части бассейна заболоченность незначительна и в целом составляет 5 %

2.2 Районирование равнинной части ЕТС по условиям формирования потерь талых вод

Равнинная часть ЕТС по условиям формирования и факторам потерь талых вод может быть подразделена на два крупных региона: северный - лесная зона и южный - лесостепная зоны. В северном регионе потери талых вод зависят в основном от степени предвесенней влагонасыщенности водосборов, а в южном — от степени водопроницаемости почв.

В каждом регионе имеются различия по степени влияния факторов, обуславливающих потери талых вод. Для правильного понимания роли отдельных факторов в формировании потерь талых вод методы их расчета и прогноза целесообразно дифференцировать применительно к отдельным районам.

Районирование выполнено [7] на основе рассмотрения общей увлажненности территории ЕТС, глубины залегания грунтовых вод, распределения основных типов почв и растительности, пространственно-временной изменчивости факторов потерь талых вод и доли их участия в формировании этих потерь.

Интегральным показателем физико- географических различий на рассматриваемой территории является среднегодовая увлажненность местности, зональной характеристикой которой может служить норма годового стока [8,9].

Представленное на рис. 3 районирование отражает степень основного

вклада тех или иных факторов в формирование потерь талых вод и указывает на характер прогностических зависимостей для водосборов рек с площадями 2-20 тыс. км кв. [7].

Северный регион включает всю лесную зону и ограничен изолиниями нормы годового стока от 12 до 5 л/с км кв, а южный - охватывает лесостепную и степную зоны с изолиниями стока от 5 до 0,5 л/с км кв.

В северном регионе выделены 3 района.

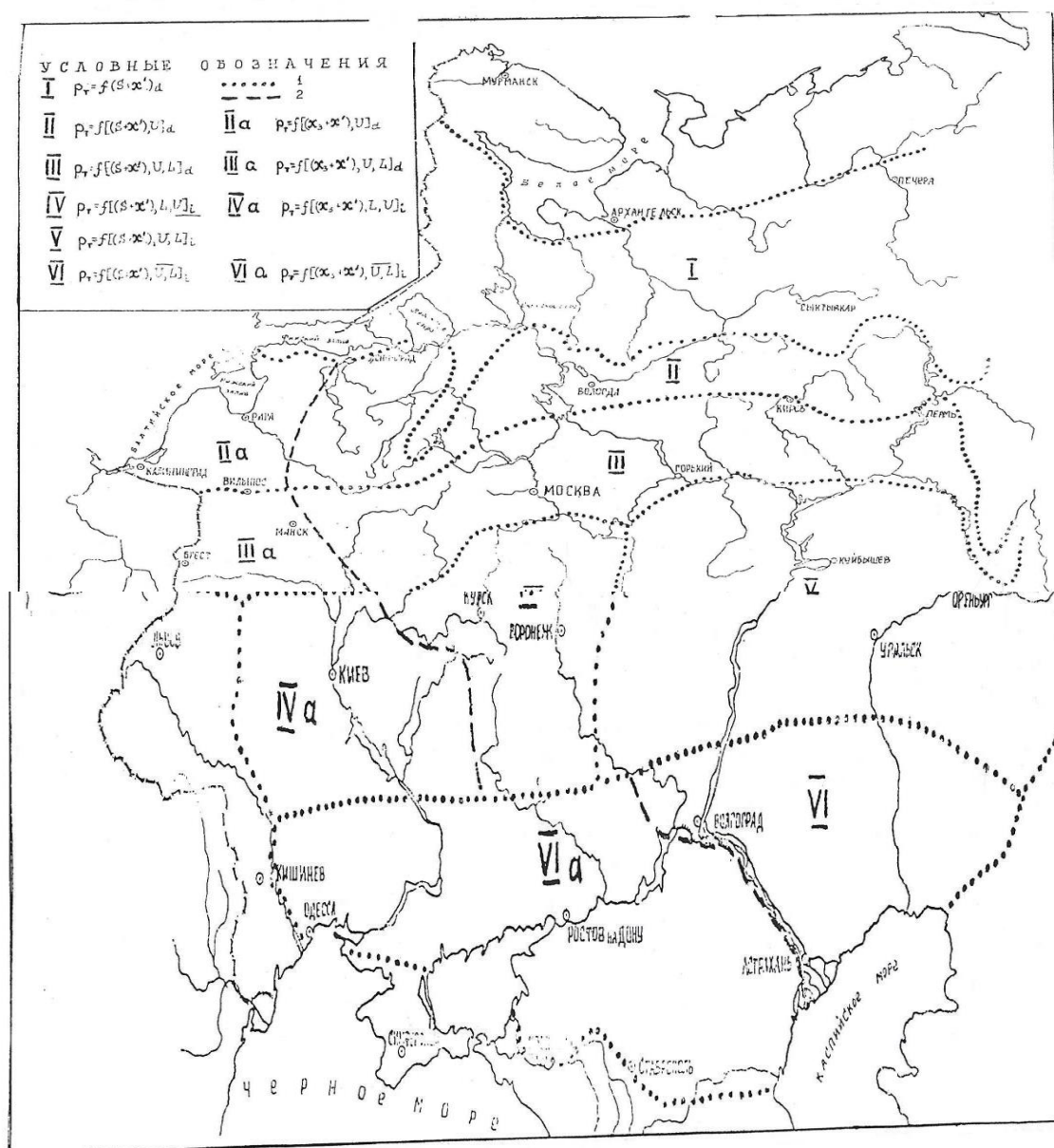
Район 1 охватывает северные таежные водосборы, расположенные в зоне избыточного увлажнения с нормой годового стока более 10 л/с км кв. На этой территории наблюдается ежегодное обильное осеннее увлажнение почвенно-грунтовой толщи. Поэтому потери талых вод здесь слагаются, в основном, из величины пополнения запасов грунтовых вод, которая мало колеблется от года к году, и потерь на испарение. Величина потерь на испарение пропорциональна запасам воды в снежном покрове. Относительные потери талых вод и коэффициенты стока весьма устойчивы, а абсолютные потери определяются в основном величиной снегозапасов и осадков (рис. 4).

Коэффициенты потерь (угол наклона линии) зависит от характера поверхности бассейна. Самая верхняя линия на графике связи с коэффициентом 0,5 относится к облесенным ($y = 70-80 \%$) водосборам, сложенным песками на 30- 40 % площади и с глубиной залегания грунтовых вод Нгр в межень 2-5 м. При суглинистых почво-грунтах, занимающих 70-80 % площади водосбора, коэффициент потерь составляет 0,4-0,3, а на безлесных водосборах с суглинистыми грунтами 0,2-0,1. Низкие коэффициенты потерь характерны также для крайне переувлажненных северных водосборов (реки Уса, Печора).

Таким образом зависимости $P_T = f(S + x)$ для водосборов первого района определяются: составом почво-грунтов, глубиной залегания грунтовых вод, залесенностью и заболоченностью.

Район 2 занимает среднюю часть лесной зоны, простираясь от Прибалтики до Урала и ограничивается изолиниями нормы годового стока от 10 до 7 л/с км кв.

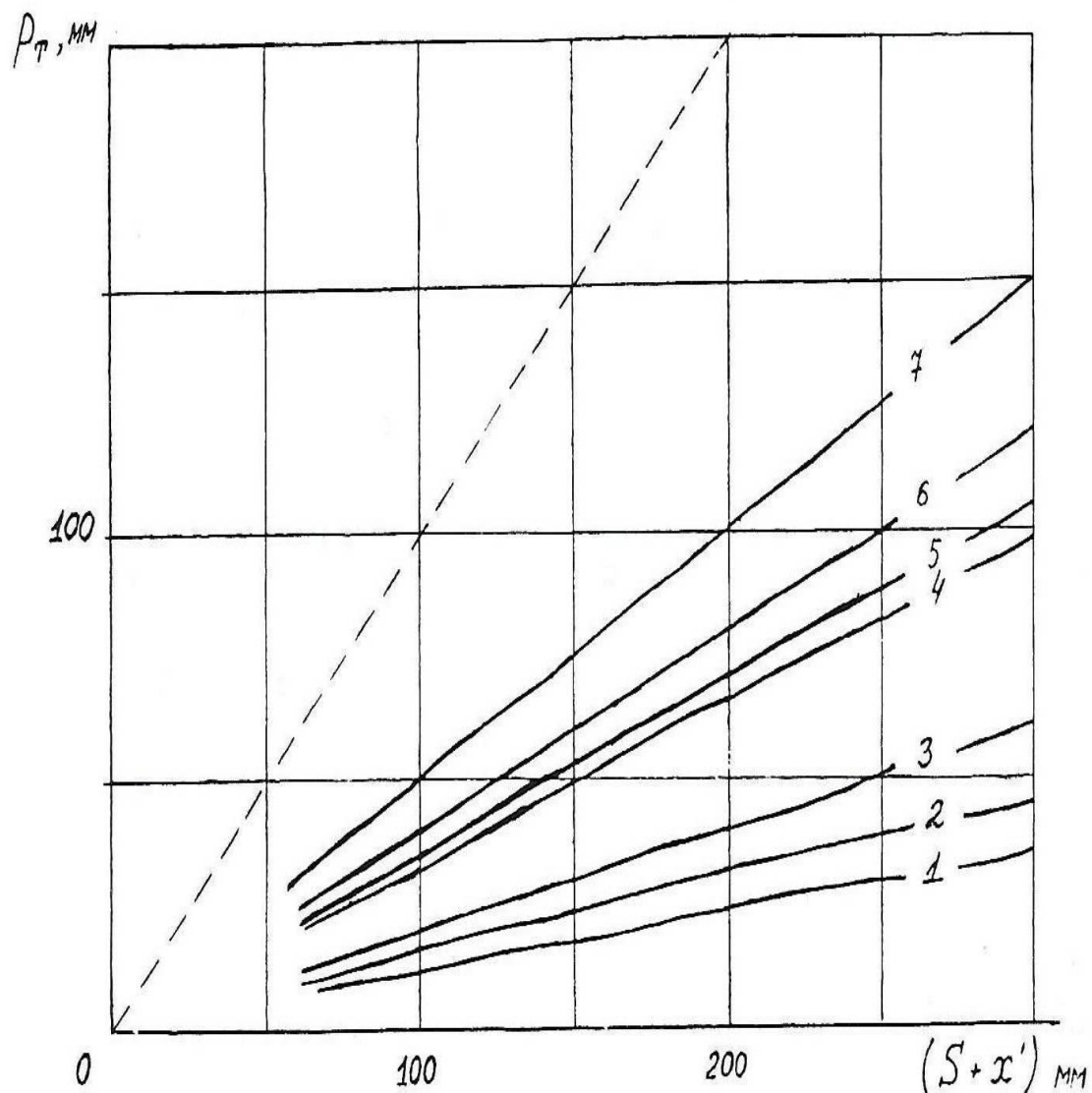
Рисунок 2.2- Районирование равнинной части ЕТС по основным факторам, формирующим потери талых вод P_t



I – граница района; II - граница подрайона; III – районы лесной зоны; IV – VI – районы лесостепной и степной зон.

В условных обозначениях: S – снеготпасы; X_z – зимние осадки; X' – весенние осадки; U – показатель увлажнения почвогрунтов; L – глубина промерзания почвы; d – показатель зависимости потерь талых вод от предвесенней влагонасыщенности водосбора; i – показатель зависимости потерь талых вод от инфильтрационной способности почв к началу весны.

Рисунок 2.3- Зависимость потерь весеннего стока от снегозапасов и осадков для водосборов первого района лесной зоны ЕТС



1 – полевые водосборы Валдайской возвышенности, коэффициенты потерь $k = 0,12$;

2 – р.Печора, $k = 0,15$;

3 – р. Уса, $k = 0,2$;

4 – р. Полометь, $k = 0,33$;

5 – р.Кама; $k = 0,35$;

6 - реки Вычегда и Сысола, $k = 0,4$;

7 – р.Березайка, $k = 0,5$

В этом районе бывают годы, когда почво-грунты к началу весны увлажнены предостаточно. Потери талых вод состоят из переменных от года к году потерь на увлажнение почвенногрунтовой толщи и испарения. Основным фактором потерь талых вод является при одинаковых запасах воды в снежном покрове предвесенняя увлажненность водосбора[11]. Поскольку между запасами влаги в метровом слое почво-грунтов и суммарным бассейновым запасом существует тесная связь[12], то в расчетно-прогностических зависимостях целесообразно использовать измеренные или надежно вычисленные запасы влаги в метровом слое почво-грунтов.

Такие зависимости применяются для прогноза потерь талых вод в бассейнах р. Верхней Волги (Ю. В. Горбунов, 1969 г. [6]). Западной Двины (О. И. Крестовский, 1981 г.) Для Верхней Волги используются запасы осенней продуктивной влаги на полевых участках, которые затем корректируются на величину выпавших жидких осадков и слоя водоотдачи из снега за время оттепелей. В расчетно-прогностической зависимости для р. Западной Двины (рис. 5) потери талых вод находятся по связи с общими запасами влаги метрового слоя почвы, измеренными на полевых участках в конце ноября.

Наличие тесных связей между запасами влаги в метровом слое почво-грунтов и бассейновым запасом, а также со стоком с бассейна позволяет принимать в качестве косвенного показателя предвесенней увлажненности бассейна величину суммарного осенне-зимнего речного стока. Речной сток за этот период характеризует увлажненность почв на начало - середину зимы и запасы грунтовых вод на конец зимы [15, 13, 14]. В качестве примера на рис.6 представлена расчетно-прогностическая зависимость потерь талых вод от осенне- зимнего стока р. Западной Двины (О. И. Крестовский, 1981 г.)

В результате обобщения 15 частных зависимостей $p_t = f(y_{oc-зим})$ с приведением слоя осенне-зимнего стока к единому периоду времени (сентябрь-январь) получена территориально-общая зависимость (рис. 7) потерь талых вод от увлажненности и характеристик водосборов: залесенность, состава почво-грунтов, заболоченности (О. И. Крестовский, 1981 г.). Для практического

Рисунок 2.4- Зависимость потерь талых вод от общих запасов влаги метрового слоя почвогрунтов, измеренных в полях на конец ноября в бассейне р. Западной Двины для створов Даугавпилс и Екабпилс.

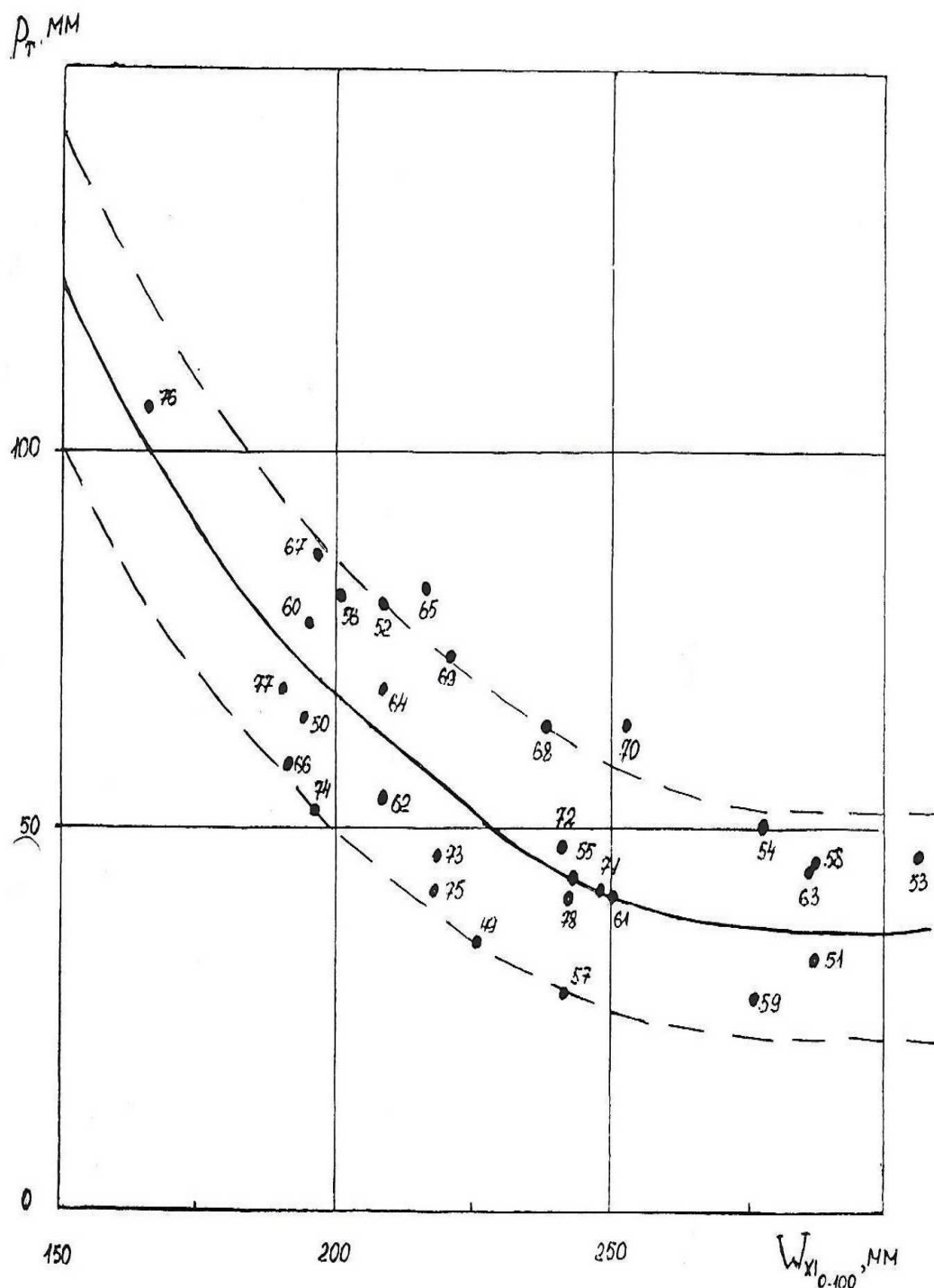


Рисунок 2.5- Расчетно – прогностическая зависимость потерь талых вод (P_t) от
осенне-зимнего стока ($y_{oc-зим}$) р.Западной Двины для створов Даугавпилс и
Екабпилс.

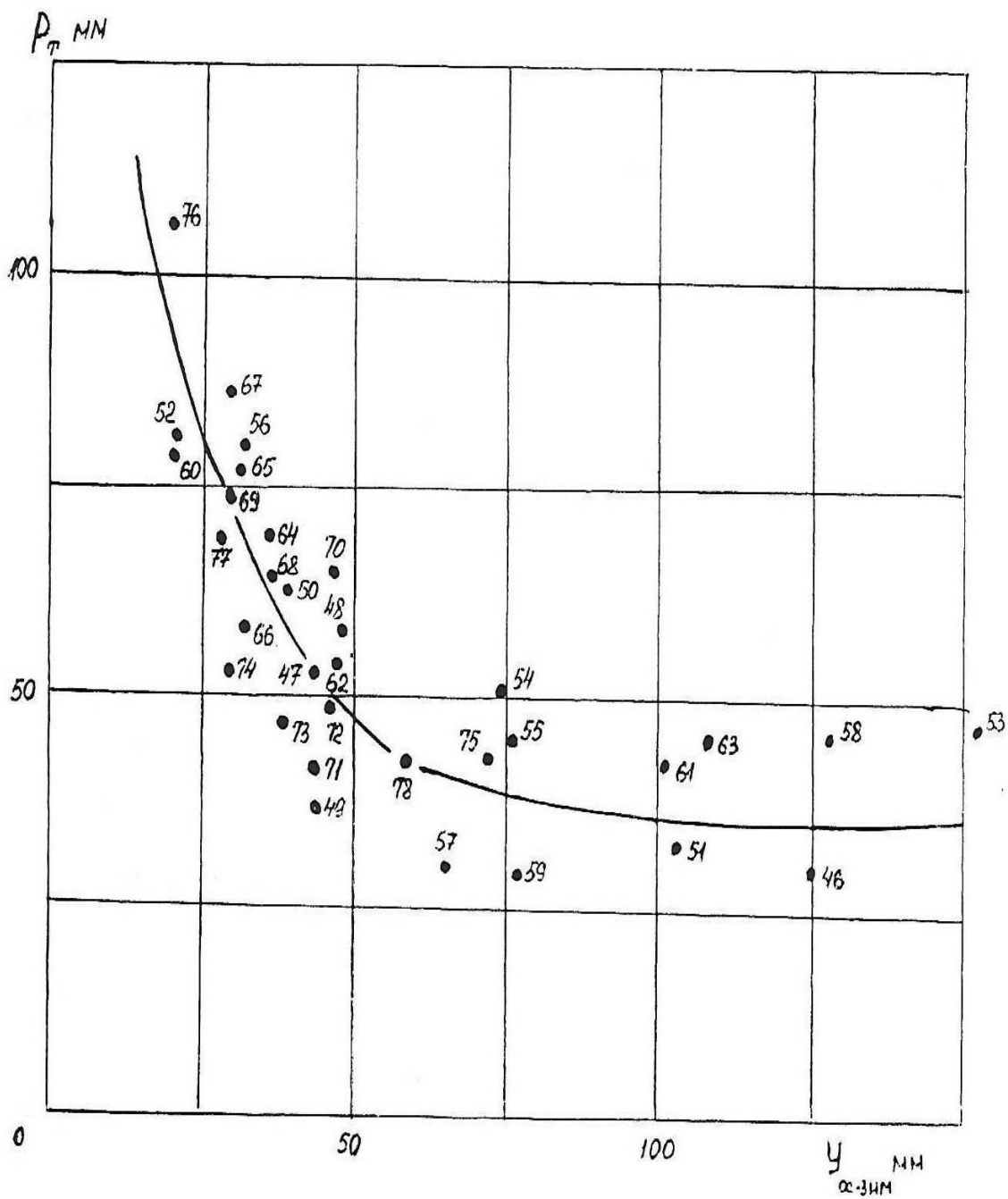
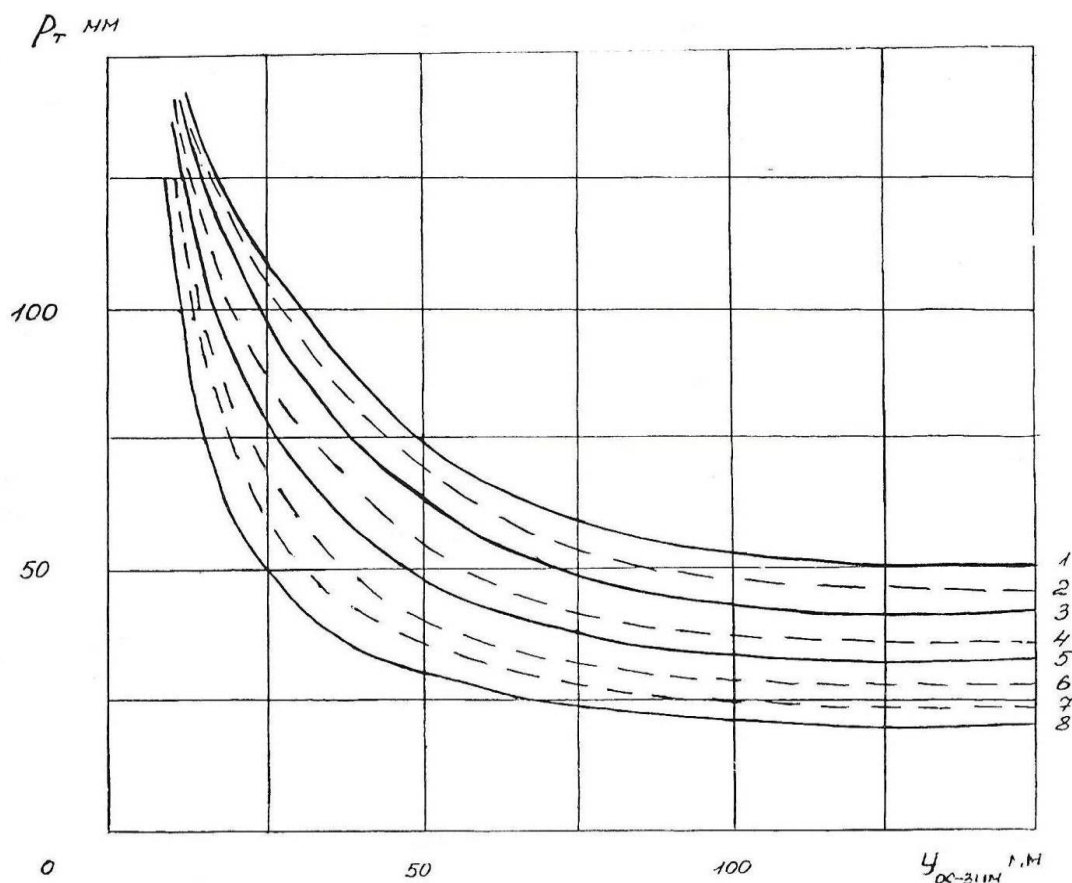


Рисунок 2.6- Территориально общая зависимость суммарных потерь талых вод от слоя осеннее – зимнего стока для Водосборов 2 района лесной зоны с учетом ландшафтных характеристик: площади сельскохозяйственных угодий α ; общей залесенности γ , включая заболоченные леса; общей заболоченности δ , в том числе и типичных болот – их площадь указана в скобках.



1- $\alpha = 5-10\%$	$y = 70-75\%$	$\delta = 25\% (> 15 - 20\%)$
2 - $\alpha = 10\%$	$y = 75-80\%$	$\delta = 20-25\%(10-15\%)$
3 - $\alpha = 20\%$	$y = 65-70\%$	$\delta = 20\% (10-15\%)$
4 - $\alpha = 30\%$	$y = 55-60\%$	$\delta = 15-20\%(10-15\%)$
5 - $\alpha = 40\%$	$y = 55\%$	$\delta = 10\% (5\%)$
6 - $\alpha = 45 - 50\%$	$y = 45-50\%$	$\delta = 10-15\%(5\%)$
7 - $\alpha = 55\%$	$y = 40\%$	$\delta = 5-10\%(5\%)$
8 - $\alpha = 60\%$	$y = 35\%$	$\delta = 5-10\% (5\%)$

использования этой зависимости необходимо иметь современные сведения по характеристикам водосборов.

За характеристику увлажненности водосборов могут быть приняты такие уровни гамма-поля земли (P_{y0}), измеренные с помощью самолетной съемки перед установлением снежного покрова. В качестве примера применения P_{y0} для прогноза потерь талых вод на рис. 8 представлена зависимость для р. Юг (Л. К. Вершинина, 1981 г.).

Использование авиационных гамма-съемок для прогнозов весеннего стока является наиболее актуальной задачей в малообжитых районах, характеризующихся редкой степенью пунктов наблюдений. В настоящее время аналогичные зависимости разрабатываются для ряда северных рек ЕТС.

Район 3 занимает южную часть лесной зоны и ограничивается изолиниями нормы годового стока от 7 до 5 л/с км кв. В этом районе отмечается большая изменчивость от года к году предвесенней увлажненности почвенно-грунтовой толщи, которая существенно зависит от характера зимнего промерзания почвы, вызывающего восходящую миграцию влаги. Раннее промерзание почв способствует удержанию избыточной осенней влаги. Здесь также нередки оттепели, приводящие к переувлажнению верхних горизонтов почв. В годы, когда промерзание почвы наступает поздно или почва остается непромерзшей, избыточная влага, образуется за счет осенних дождей и зимних оттепелей, просачивается вглубь и стекает подземным путем в реки. Влияние зимнего промерзания почв на дополнительное их увлажнение в лесах значительно меньше, чем на открытых участках водосбора, что обуславливает повышенные потери талых вод на лесных участках [14,16].

При одинаковой увлажненности в случаях слабого промерзания почвы суммарные потери на водосборах больше на 15-30 % (20-50 мм), чем при глубоком промерзании ($L \geq 70 - 80$ см). Наибольшее влияние промерзания проявляется при высокой влажности почвы (0,9-1,1 НВ). Промерзание сухих почв мало влияет на уменьшение потерь талых вод.

Рисунок 2.6- Зависимость потерь талых вод от предзимнего гамма – излучения
 $P_{\gamma 0}$ почвогрунтов водосбора р.Юг.

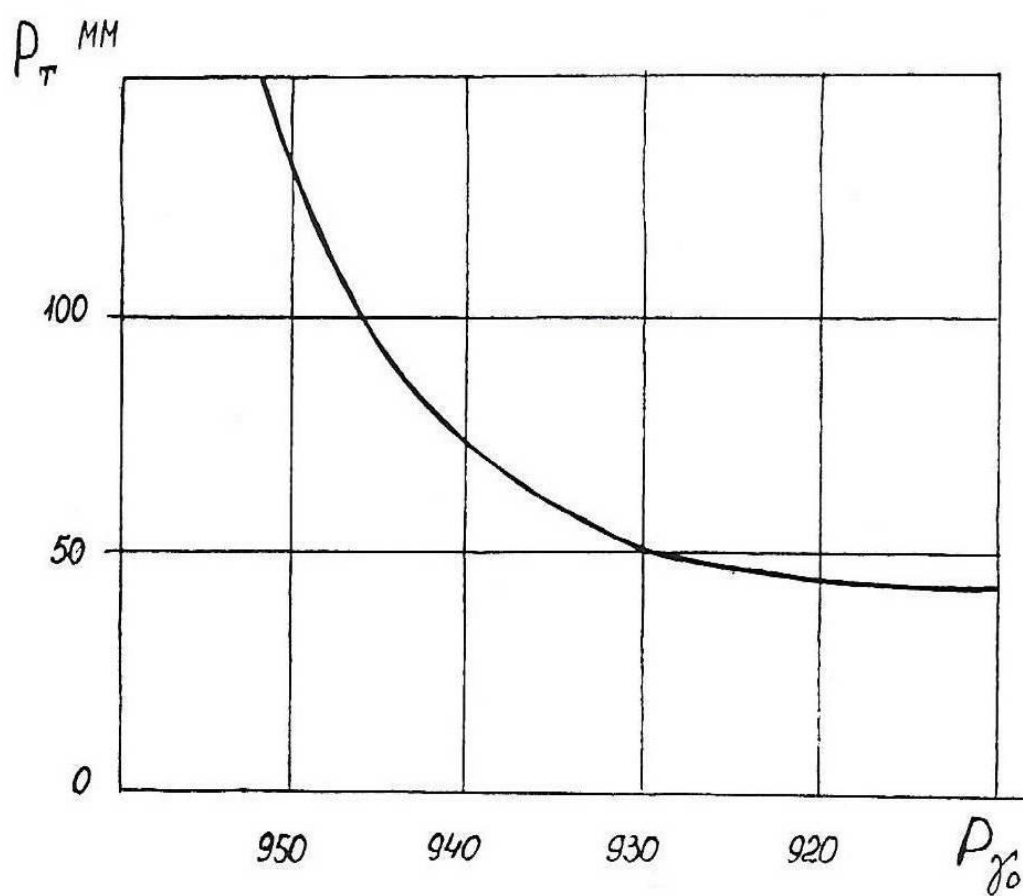
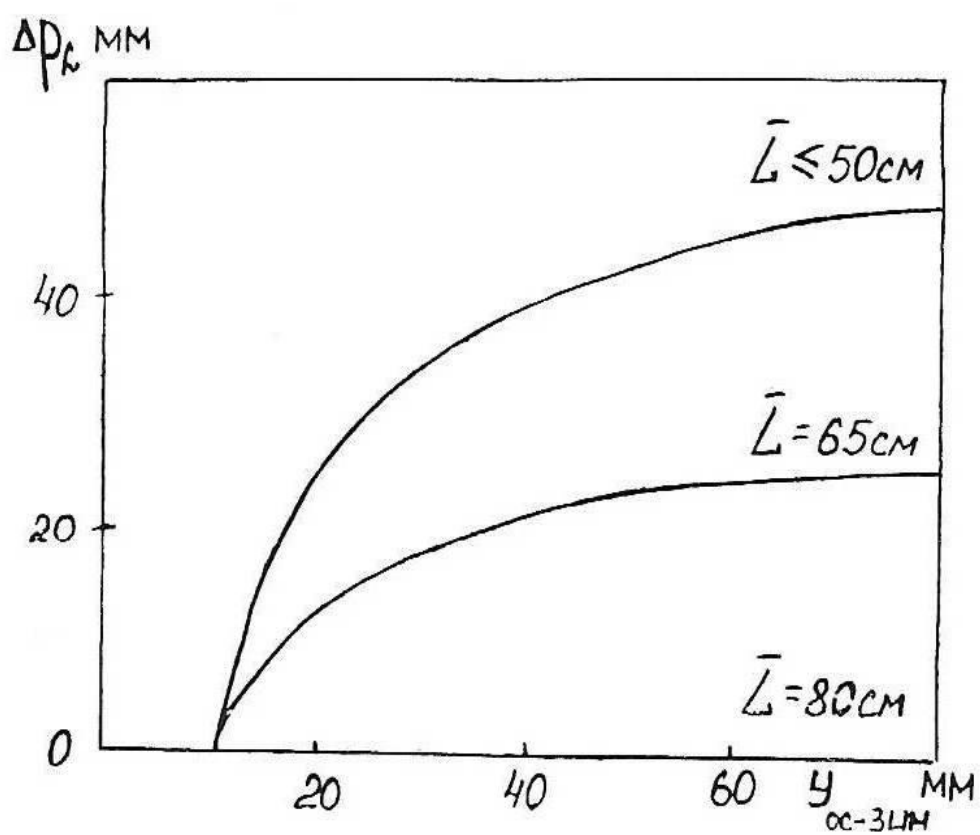


Рисунок 2.7- Зависимость дополнительных потерь талых вод ΔP_L , связанных с глубиной промерзания почв L и степенью увлажнения $y_{ос-зим}$ водосбора р.Вятки у г.Вятские Поляны.



Учет промерзания почвы в качестве дополнительного фактора потерь иллюстрируется расчетно-прогностической зависимостью (рис. 9) для бассейна р. Вятки [15]. В этом бассейне суммарная величина прогнозируемых потерь талых вод определяется как сумма

$$p_t = p_u + \Delta p_L, \quad (2.1)$$

Где p_u - потери, зависящие от увлажненности бассейна (U) при глубоком промерзании почв в полях ($L \geq 80$ см); Δp_L - дополнительные потери в годы, когда $L < 80$ см; за показатель U принят слой речного стока за сентябрь-январь.

Основным фактором потерь талых вод в этом районе является увлажнение почво-грунтов в сочетании с их промерзанием.

Оценка предвесенней увлажненности водосборов для расчета потерь талых вод выполняется также, как и для водосборов второго района. Расчетно-прогностические зависимости $P_U = f(U)$ в третьем районе аналогичны зависимостям, проведенным для района 2.

В южном регионе также выделены 3 района (4-6).

Район 4 занимает западную и центральную части лесостепной зоны с нормой годового стока от 5 до 1,5 л/с км кв. Восточной границей его является водораздел рек Цны и Хопра. В этом районе изменчивость водопроницаемости почв и соответственно потерь талых вод в основном зависит от степени промерзания увлажненность почв в 90-95 % случаев (зим) близка и превышает наименьшую влагоемкость. Высокая увлажненность почв обуславливается наличием достаточно высокой влажности с осени и частыми зимними оттепелями. Поэтому основным фактором потерь талых вод является глубина промерзания почвы, а дополнительным фактором - влажность почв — в годы с недостаточным их увлажнением.

Район 5 занимает восточную часть лесостепной зоны от водораздела р. Хопра с р. Доном до Урала. Здесь предвесенняя степень водопроницаемости почв и ее изменчивость почти полностью определяется состоянием

увлажнения, так как промерзание почвы в большинстве случаев (зим) бывает достаточно глубоким (более 60 см). Поэтому, главным фактором, определяющим величину потерь талых вод является увлажненность водосборов, а глубина промерзания почвы влияет на потери только в годы со слабым промерзанием.

Район 6 занимает степную зону и ограничен изолиниями годового стока от 1,5 до 0,5 л/с км кв. Водопроницаемость почв в этом районе зависит от сочетания предвесеннего их увлажнения и промерзания, имеющих большую изменчивость по годам. Поэтому основными показателями потерь талых вод являются предвесенняя влажность и промерзание почвы.

В западных частях районов 2, 3, 4 и на большей части района 6, имеют место частые оттепели, приводящие иногда к частичному и даже полному сходу снега среди зимы (на схеме рис.3 эти подрайоны обозначены литерой «а»). При такой зимней обстановке в методах долгосрочных прогнозов потерь талых вод вместо запасов воды в снежном покрове следует использовать сумму зимних осадков за вычетом слоя стаявшего снега или за вычетом зимнего снега или за вычетом зимнего паводочного стока.

Приведенное районирование отражает условия формирования потерь на водосборах средних и небольших размеров (2-20 тыс км кв), находящихся в пределах однородных районов. Крупные речные бассейны могут рассматриваться в 2х-3х и более районах. В таких случаях целесообразно разрабатывать прогностические зависимости отдельно по частям бассейна. При этом каждая из частей бассейна может характеризоваться стоком с типичного небольшого водосбора, расположенного в одном однородном по условиям формирования потерь талых вод районе. Тогда сток с крупного речного бассейна может рассчитываться и прогнозироваться по данным о стоке с типичных водосборов [18]

Погрешность расчета ежегодных величин стока половодья с крупных речных бассейнов по нескольким небольшим водосборам с суммарной площадью, составляющей 15-25 % от всего бассейна, не превышает 10 %, т.е.

не выходит за пределы погрешностей гидрометрических данных.

2.3. Распределение стока весеннего половодья и обуславливающих его факторов по территории бассейна.

Все изложенные в разделе результаты получены на основе анализа рядов наблюдений за исходными данными за период 1959-1980 гг. При этом данные по стоку в замыкающем створе (р. Вятка — г. В. Поляны), снегозапасам и влагозапасам почвы в метровом слое в пунктах наблюдений за конкретные годы были собраны сотрудниками ГГИ под руководством О. И. Крестовского.

Из табл. 1 видно, что средние многолетние значения стока половодья распределяются по территории достаточно неравномерно. Наибольший слой стока (166 мм) наблюдается в верховьях р. Вятки до с. Красноглинье, наименьший (76 мм) - на водосборе р. Валы. Слой стока за половодье в целом уменьшается в направлении с севера на юг. Норма стока в северной части бассейна (реки Молома, Великая, Летка и Кобра) сравнительно мало изменяется по территории и составляет 130-140 мм. В средней и южной частях наблюдается заметное возрастание изменчивости норм стока по территории. Так, на граничащих между собой водосборах рек Чепцы и Кильмези слои стока при практически одинаковых нормах водоподачи составляют соответственно 124 и 93 мм что свидетельствует о различных условиях формирования стока на этих водосборах.

Наибольшая изменчивость стока половодья (табл. 1) характерна для северных водосборов ($C_v = 0,45$), а наименьшая - для водосборов юго-восточной части бассейна, где значения коэффициента вариации стока изменяются от 0,22 до 0,27.

Коэффициент стока половодья (K_c) для большей части территории близок к 0,6. Экстремальные значения наблюдаются на водосборах рек Верхней Вятки ($K_c = 0,71$) и Валы ($K_c = 0,4$).

Нормы потерь изменяются по территории бассейна заметно меньше, чем нормы стока. При этом нельзя указать пространственных закономерностей их изменения. Например, водосборы рек Лозы и Летки имеют совпадающие нормы, а гораздо ближе расположенные друг к другу водосборы рек Лобани и Вала заметно различаются по нормам потерь.

Таблица 2.1- Отдельные характеристики водосборов бассейна р. Вятки

Река - пункт	F, км	F, %	s, мм	p, мм	y, мм	K _c	C _{vy}	C _{vp}
Молома – с.Пермятское	6070	0	218	84	134	0,61	0,42	0,26
Великая – с.Великорецкое	3410	5	226	91	135	0,6	0,46	0,24
Летка-с.Казань	2870	5	226	94	132	0,6	0,5	0,19
Кобра-д.В.Тюрюханы	7410	0	227	87	140	0,62	0,4	0,21
Пижма – д.Худяки	6690	0	166	64	102	0,61	0,43	0,31
Вятка – с.Красноглинье	2320	0	235	69	166	0,71	0,28	0,4
Чепца – г.Глазов	9750	0	198	74	124	0,63	0,31	0,35
Лоза – шт.Игра	1110	5	200	93	107	0,54	0,35	0,26
Лобань – с.Р.Ватага	2300	0	196	74	122	0,62	0,27	0,46
Кильмезь – д.Вичмарь	16400	5	201	108	93	0,46	0,22	0,33
Вала – с.Вавож	4770	60	188	112	76	0,4	0,26	0,32

F – площадь водосбора;

f – заселенность водосбора;

S, p, y – соответственно средние за период половодья значения вододачи, потерь и стока

K_c – коэффициент стока половодья

C_{vy} и C_{vp} - соответственно коэффициенту вариации стока половодья и потерь стока

Для исследования характера распределения по территории максимальных снегозапасов использованы данные наблюдений с 1959 по 1980 годы по 30-ти пунктам в поле и 15-ти в лесу.

Пункты наблюдений за снегозапасами в поле распределены по территории довольно равномерно.

Пункты наблюдений за снегозапасами в лесу при своем незначительном количестве распределены по территории неравномерно. Основное число их расположено в восточной части бассейна. Западная и центральная части почти не освещены наблюдениями.

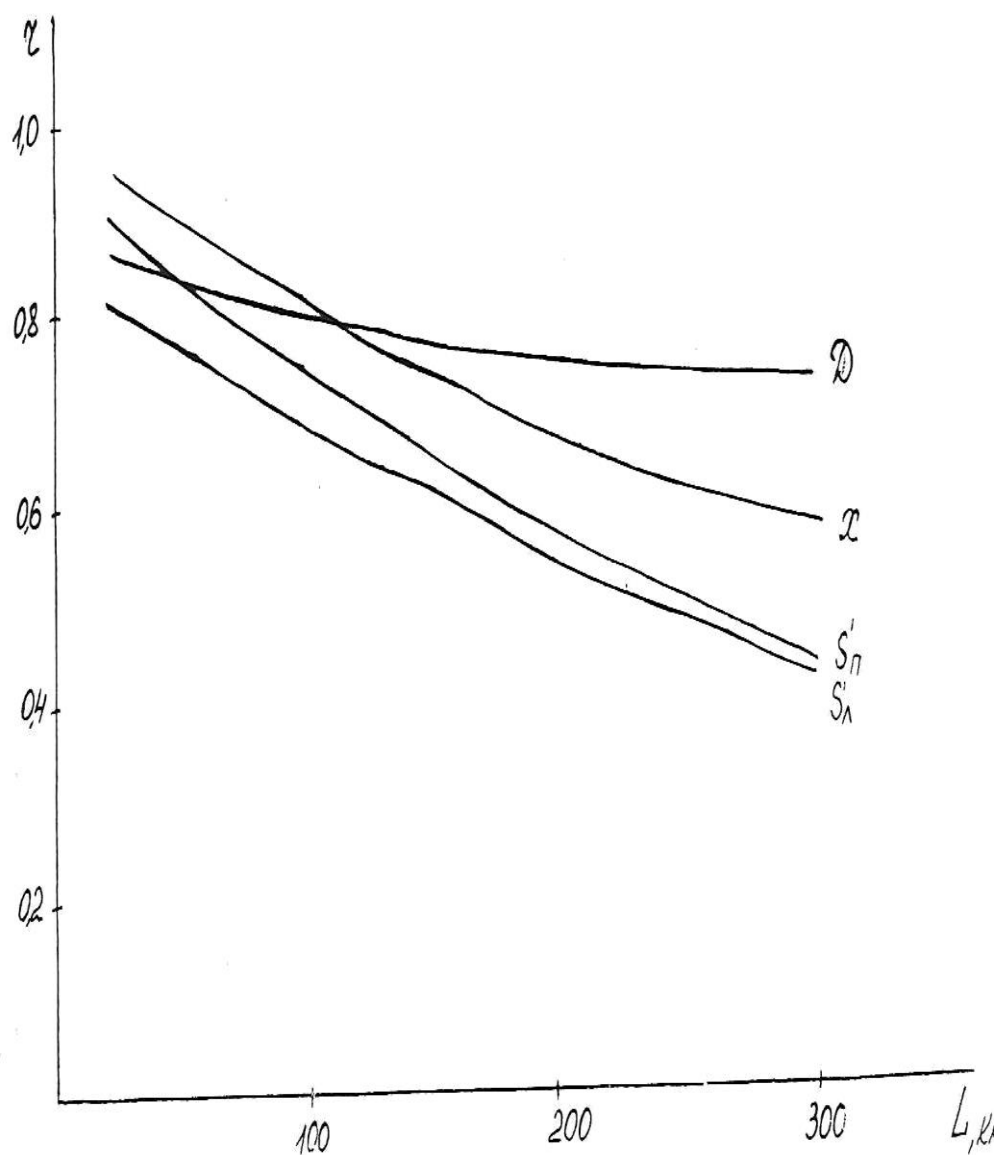
Снегозапасы в поле увеличиваются по направлению с юга на север и с юго-запада на северо-восток. Средние многолетние снегозапасы по всей территории составляют 152 мм. Средние многолетние запасы на юго-западе (водосборы рек Ярань, Пижма) составляют 110-130 мм. В центральной северной и северо-восточной частях снегозапасы составляют 140-170 мм (водосборы рек Быстрицы, Лобани, Лозы, Валы, Верхней Вятки, Кобры, Моломы, Чепцы). Максимальные запасы, как правило, формируются в верховьях р. Вятки.

Снегозапасы в лесу (средние многолетние) на юге восточной части территории бассейна составляют 140-160 мм, они возрастают в северном направлении, достигая 180-200 мм, а в отдельных пунктах (Омутнинск, Карсовый) - 230 мм.

Представление о пространственной связности снегозапасов в поле и в лесу дают корреляционные функции (рис. 10). На графиках ясно прослеживается уменьшение пространственной связности с увеличением расстояния. Вместе с тем при расстоянии 100-140 км связность для полевых участков все еще остается высокой, коэффициент корреляции (r) равен 0,75-0,65. Для лесных снегозапасов связность также высока, хотя несколько ниже, чем в поле: для расстояний в 100 км $r = 0,70$.

Весеннее снеготаяние обычно начинается в южной части бассейна, распространяясь затем на север и северо-восток.

Рисунок 2.8- Пространственные корреляционные функции максимальных
 снегозапасов в лесу ($\hat{S}_л$) и в поле ($\hat{S}_п$) , весенних осадков (x) и сумм
 среднесуточных значений дефицита влажности воздуха (D)



В южной, менее облесенной части бассейна снеготаяние заканчивается, в среднем на 15 суток раньше, чем в северной, однако в отдельные годы эта разница достигает 30 суток [19].

Осадки, согласно [20, 19], учитывались за период от даты наступления — максимальных снегозапасов до даты схода снега с 70-80 % площади в лесах на территории. Дата схода снега с 70-80 % площади лесных участков примерно соответствует дате прохождения пика половодья на реках с облесенными водосборами площадью 5000-15000 км кв.

Средние многолетние значения осадков увеличиваются с юга на север, что, по-видимому, обусловлено как нарастанием запаздывания начала снеготаяния, так и нарастанием самого времени снеготаяния в этом же направлении. Нормы осадков для водосборов северных рек (Моломы, Великой, Летки, Кобры), а также для верховий Вятки составляют 60-70 мм при коэффициентах вариации от 0,55 до 0,72, для водосборов Чепцы, Лозы, Кильмези, Лобани, Валы — 42-43 мм при коэффициентах вариации 0,6-0,7. Несколько меньше норма осадков для водосбора р. Пижмы (38 мм), но коэффициент вариации осадков здесь также велик и равен 0,66.

Таким образом, одна из составляющих водоподачи, неизвестная к дате выпуска прогноза и плохо прогнозируемая современной метеорологией, имеет не только большие средние значения, но и большую изменчивость во времени на всей территории изучаемого бассейна. Вместе с тем пространственная связность осадков достаточно тесная при расстоянии 100-130 км коэффициенты корреляции составляют 0,8-0,7 (рис. 10).

Суммы среднесуточных значений дефицита влажности воздуха (Д) вычислялись за те же периоды времени, что и осадки, по 12-ти пунктам, равномерно расположенным по территории бассейна р. Вятки. Если сравнивать средние многолетние значения Д по отдельным метеостанциям, то можно прийти к выводам, что эти значения весьма мало изменяются по территории. Наименьшее значение Д равно 60 мб (г. Фаленки), а наибольшие - 80 мб (г. Опарино). Среднее арифметическое таких средних для всего бассейна

составляет 70 мб. Коэффициенты вариации переменной D также мало изменяется в пространстве - от 0,35 (г. Нолинск) до 0,47 (г. Яранск). Среднее значение коэффициента вариации равно 0,4, что свидетельствует о довольно существенной изменчивости переменной D во времени. Действительно, осредненные по пространству значения D меняются в очень широком диапазоне - от 27 мб (1964 г.) до 145 мб (1976 г.). Очень велика и амплитуда колебаний пространственных коэффициентов вариации во времени: $C_v = 0,09$ (1976 г.) и $C_v = 0,46$ (1972 г.).

Корреляционная функция сумм дефицита влажности воздуха убывает с расстоянием более медленно, чем функции других, рассмотренных здесь переменных (рис. 10). Это означает, что данные наблюдений за дефицитом влажности воздуха в каждом конкретном пункте могут быть распространены на большую площадь, чем данные наблюдений за другими элементами.

Под стоком за осенне-зимние месяцы (Y_{oc}) в настоящей работе понимается суммарный слой стока за ноябрь и декабрь предшествующего года. Средние многолетние значения стока заметно изменяются по территории, нарастая с юга на север. На южных реках (Вала и др.) сток за осенне-зимние месяцы составляет 10-12 мм, а на северных (Кобра, Верхняя Вятка и др.) - 25-30 мм. Коэффициенты вариации стока заметно различны. Например, $C_v = 0,75$ для стока р. Летки и стока р. Лобани $C_v = 0,36$.

Определенные по территории значения Y_{oc} от года к году также колеблются в широких пределах: 7 мм (1961 г.) и 40 мм (1966 г.). Коэффициенты пространственной вариации стока от года к году изменяются от 0,32 до 0,74. Таким образом, для стока за осенне-зимние месяцы характерна значительная изменчивость как в пространстве, так и во времени.

2,4 Предложения по дифференцированному расчету и прогнозу составляющих потерь весенних вод.

Поскольку суммарные потери, как указывалось выше, зависят от многих факторов, представляется целесообразным выделить каждую их составляющую и связать ее с определяющими факторами. Такими приемами можно будет использовать для прогноза элементов потерь, что особенно высоко для водосборов лесной зоны, отличающейся большим разнообразием почвенно-ландшафтных условий, обуславливающим пестроту потерь стока по площади водосборов.

Расчленение суммарных потерь на составляющие элементы выполняется по данным непосредственных наблюдений или расчетным путем, что весьма трудоемко. Поэтому дифференциацию потерь талых вод с разработкой методов прогноза их элементов целесообразно выполнять для отдельных, наиболее типичных водосборов рек всех зон ЕТС.

Реализация этого предложения может существенно повысить надежность долгосрочных прогнозов суммарных потерь талых вод и стока половодья и даст возможность производить контроль над значениями стока с соседних водосборов, прогнозируемыми обычными методами. Кроме того, появится возможность для дальнейшего изучения физических процессов формирования потерь весенних вод в зависимости от обуславливающих факторов.

Расчленение суммарных потерь талых вод на составляющие элементы выполняется по уравнению водного баланса речного бассейна решаемого относительно стока талых вод U_T :

$$U_T = (S + X) - P = (S + X) - (E + \Delta W + \Delta U), \quad (2.2)$$

Где s - запас воды в снеге и ледяной корке на почве к началу весны или на дату составления прогноза;

x - осадки за период формирования стока на склонах водосборов: от даты

составления прогноза или начала весны до даты оттаивания почвы в полях;

E — испарение за период учета осадков;

ΔW - изменение запасов влаги в почвогрунтах зоны аэрации за период с конца февраля — середины марта до даты конца периода учета осадков;

ΔU - суммарное изменение запасов грунтовых вод за период половодья.

Потери воды на испарение в данный весенний период зависят в основном от продолжительности этого периода и для разных зон изменяются от 8-15 до 30- 60 мм, что составляет 15-30 % приходной части водного баланса периода половодья [23]. Суммарное испарение за период формирования паводочного стока для всех зон ЕТС складывается из следующих величин:

- Испарения со снега за период от даты максимальных снеготолщин до даты начала водоотдачи из снега (рассчитывается по средней интенсивности испарения 0,3 мм/сут.);
- Испарения со снега в период снеготаяния до появления проталин (определяется по средней интенсивности испарения 0,5 мм/сут);
- Испарения за период пестрого ландшафта — со снега, с воды и почвы (рассчитывается по формуле $E = 0,44 \sum D$, где $\sum D$ - сумма средних суточных значений дефицита влажности воздуха, мм); средняя интенсивность испарения в этот период колеблется от 0,5 до 1 мм/сут;
- Испарения с поверхности почвы в период после схода снега до оттаивания почвы в полях, рассчитываются по указанной выше формуле. Средняя интенсивность испарения в этот период составляет 0,8-1,2 мм/сут.

Колебания интенсивности испарения за каждый из указанных генетических периодов незначительны от года к году. Общая продолжительность этих периодов T в основном определяется снеготолщинами к началу весны [22]. Это позволяет прогнозировать потери на испарение, используя графические зависимости вида $E = f(S)$.

Испарение с лесных комплексов за период снеготаяния можно принимать равным испарению с поля [24].

Весеннее наполнение запасов влаги ΔW в почвогрунтах зоны аэрации

расчитывается как разность между запасом $W_{\text{кон}}$, измеренным сразу после оттаивания почвы (а при талых почвах — сразу после схода снега), и запасом перед началом весны $W_{\text{нач}}$.

В конце оттаивания почвы (после схода снега) запасы влаги в ней из года в год всегда постоянны в лесной зоне, а в лесостепной - в 90 % всех весен. Это постоянство запасов объясняется водоудерживающей способностью талых почв, равной наименьшей влагоемкости или превышающей ее на 10%, наблюдается при многослойном сложении почвогрунтов. Указанная влагоемкость (общий запас влаги метрового слоя почвы) составляет: для песков под лесом 100 мм, для суглинисто-подзолистых почв в полях 320 мм и лесах 350 мм, для суглинистых черноземов 330 мм [21,22,26].

Ежегодное постоянство запасов на водосборах $W_{\text{кон}}$ позволяет прогнозировать потери талых вод на пополнение запасов влаги в почвогрунтах зоны аэрации как разность

$$\Delta W = W_{\text{кое}} - W_{\text{нач}} \quad (2.3)$$

Пример расчетно-прогностической зависимости, полученной по формуле (9), представлен на рис.2.9

Расчет и прогноз потерь талых вод на увлажнение почвогрунтов следует производить для следующих по глубине верхних слоев: в северных таежных районах — 0,5 м; в остальных районах лесной и в северной части лесостепной зон -1,0 м; в лесостепной зоне - 1,5 м; в степной зоне - 2,0 м. Ниже указанных глубин запасы влаги в осенне-зимне-весенние периоды года не меняются, т.е. сохраняется постоянная влажность, равная наименьшей влагоемкости или превышающая ее.

Пополнение запасов грунтовых вод рассчитывается как разность между запасом, измеренным или вычисленным на конец весеннего половодья и запасам перед началом весны.

За конец весеннего половодья принимается дата, когда на спаде суточный

слой стока с водосборов средних размеров (5-20 тыс. км кв) составляет 0,5-0,6 мм/сут в лесной зоне и 0,2-0,3 мм/сут - в лесостепной.

Установлено, что в лесной зоне ЕТС в конце весеннего половодья реки находятся почти исключительно на грунтовом питании [21, 22]. Поэтому существует зависимость между запасом грунтовых вод и стоком реки на спаде половодья и межень. Такие зависимости получены для водосборов лесной зоны, сложенных разными грунтами: супесями, суглинками, песками. Поскольку дата конца половодья устанавливается ежегодно по одному

Рисунок 2.9- Зависимость потерь талых вод на увлажнение почв в поле p_w от среднего запаса влаги W_{0-100} в метровом слое суглинистых почв в р.Вятка

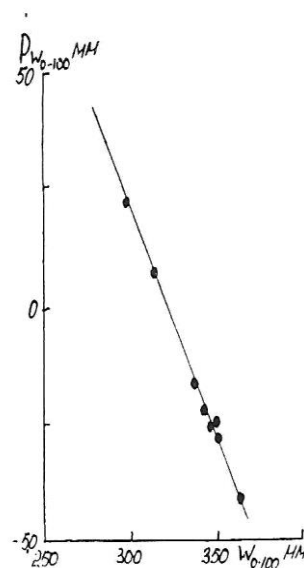
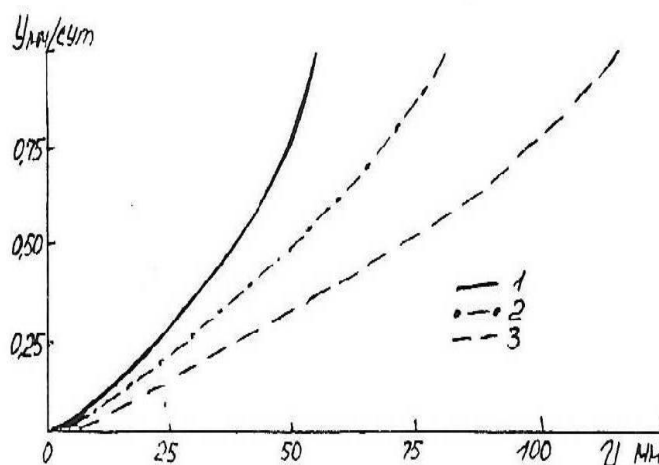


Рисунок 2.10- Зависимость запасов грунтовых вод U от суточного слоя стока рек Y на спаде паводков и в межень для водосборов лесной зоны ЕТС



- 1 - водосборы с суглинистыми грунтами на 90 % площади;
- 2 – водосборы с суглинисто-супесчаными грунтами (пески занимают 35 % площади);
- 3 - водосборы с песчаными грунтами на 60 % площади

и тому же расходу воды в реке $U_{\text{кон}}$, то ежегодно имеет место один и тот же запас грунтовых вод в конце половодья $U_{\text{кон}}$. Это положение позволяет давать долгосрочный прогноз потерь весенних вод на пополнение запасов грунтовых вод по данным наблюдений - по равенству

$$\Delta U = U_{\text{кон}} - U_{\text{нач}} \quad (2.4)$$

или по зависимостям $U_{\text{гр}} = f(Y)$, представленным на рис. 2.10 [17,19].

Если применять для каждого половодья $U_{\text{кон}} = U_{\text{кон}}$, то будет выполняться равенство $U_{\text{кон}} = U_{\text{кон}}$, и тогда зависимость $U = f(y)$ можно перестроить в зависимость $p_U = f(y_{\text{нач}})$, т.е. в зависимость потерь на пополнение запасов грунтовых вод от суточного стока реки в конце зимы (рис. 13).

Установлено, что потери весенних вод p_U зависят от состава водоносных грунтов и запаса грунтовых вод к началу весны. Для одинаковых грунтов в поле и лесу ежегодно наблюдается равенство запасов грунтовых вод к началу весны и потерь на их пополнение. По сравнению с суглинками потери в супесях больше в 1,3 раза, а в песках - 2,5-3,0 раза [27].

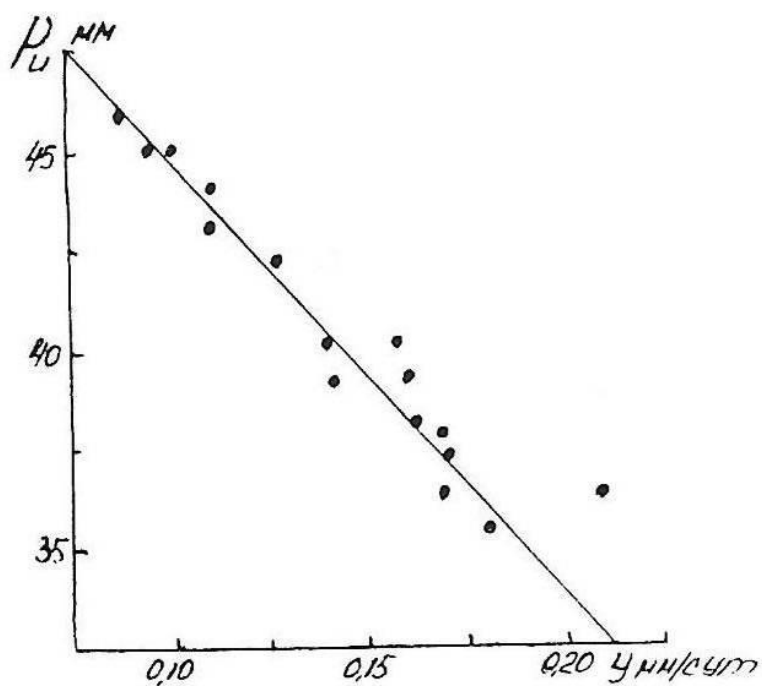
Воднобалансовый метод позволяет производить расчет и давать долгосрочный прогноз потерь талых вод и весеннего стока отдельно для поля и леса.

Расчленение потерь талых вод и усовершенствование на этой основе методов долгосрочных прогнозов весеннего стока целесообразно проводить при достаточно высокой точности определения элементов потерь и их суммарного значения. Надежность определения потерь обуславливается прежде всего качеством исходной информации, ее полнотой и правильностью принятых методов расчета.

Проверка надежности расчленения потерь должна выполняться путем решения уравнения водного баланса водосбора за период весеннего половодья по выражению (8), в котором все элементы баланса измерены или вычислены с учетом различий в почвенно-ландшафтных комплексах. Критерием надежности

являются значение и знак невязки водного баланса. Надежными следует считать данные, когда в 68 % случаев невязки балансов имеют переменный знак и не превышают 10-15 мм.

Рисунок 2.11-Зависимость потерь талых вод на пополнение запасов грунтовых вод p_u для бассейна р. Вятки от среднего суточного слоя стока, измеренного в первой декаде марта у г.Вятские Поляны.



3. Расчет и прогноз стока весеннего половодья.

Объектом наших исследований был водосбор реки Кобры до деревни В. Тюруханы. Река Кобра является одним из притоков р. Вятки. Бассейн Кобры почти полностью располагается на территории Кировской области в лесной зоне России. Отдельные характеристики водосбора реки Кобры приведены в таблице 1.

Данные таблицы свидетельствуют о значительной большой (70 %) заселенности бассейна, что определяет замедленное таяние снега и большую продолжительность половодья, которая в свою очередь, обуславливает значительные суммы осадков и испарения за период половодья.

Данные таблицы 1 говорят также о большом коэффициенте стока весеннего половодья (0,61) и заметной изменчивости от года к году стока весеннего половодья. Коэффициент вариации стока составляет 0,43.

Большой вклад в измерение весеннего стока в лесной зоне и его факторов был внесен Е. С. Змиевой. В дальнейшем исследования по этим проблемам были продолжены О. И. Крестовским, который занимался изучением формирования стока весеннего половодья и его потерь непосредственно для условий бассейна р. Вятки. Мы опирались в основном на разработки О. И. Крестовского, как более поздние и вобравшие в себя опыт и других исследователей.

Согласно О. И. Крестовскому, потери стока весеннего половодья в той части лесной зоны, где глубина залегания грунтовых вод относительно дневной поверхности составляет 1-3 метра, состоят из затрат воды на увлажнение почвогрунтов в зоне аэрации, затрат воды на пополнение грунтовых вод и затрат воды на испарение. Последняя статья потерь, по мнению О. И. Крестовского существенна в лесной зоне, вследствие большой продолжительности снеготаяния и половодья, и поэтому должна учитываться. Действительно, испарение с поверхности почвы и транспирация влаги лесной

растительности в весеннее время идет весьма активно. Большая продолжительность этих процессов обуславливает большие затраты влаги на испарение. Однако, здесь остается до сих пор не выясненным вопрос о том, все ли испарения или только какая-то его доля должны быть отнесены к потерям стока. Ведь испаряться может как влага, имеющая возможность принять участие в стоке (гравитационная), так и стоковая влага, т.к. влага достаточно прочно связанная со скелетом почвы. Если испарение первой влаги, безусловно, должно быть отнесено к потерям стока, то испарение второй не может полностью отождествляться с потерями стока. Например, представим себе, что за период от схода снега до конца половодья не было осадков. В таком случае испарение связанной влаги не нанесло никакого ущерба стоку. Ведь испарилась влага, которая, все-равно, не могла бы стечь. Приведем еще пару примеров, показывающих сложность, с которой сталкивается прогнозист при попытке учесть испарение как потери стока. Пусть испарилось 30 мм нестоковой влаги, а затем выпало 10 мм осадков. В этом случае испарение как потери должно составить только 10 мм, так как если бы испарения не было, то все осадки пошли бы на сток. Если же мы предположили, что после испарения в 30 мм выпало не 10 мм, а 35 мм осадков, то тогда потери стока за счет испарения должны составить 30 мм. Рассмотренные примеры говорят о том, что корректная оценка испарения как потерь стока является довольно сложной задачей.

В качестве стокоформирующих факторов нами рассматривались запасы воды в снеге (s), осадки за период снеготаяния и половодья (x), сумма дефицита влажности воздуха за период снеготаяния и половодья (D), запасы влаги в первом метровом слое почвы (W) и суммарный слой стока p . Кобры за ноябрь и декабрь, предшествующих половодью (y_{oc})

Остановимся несколько подробнее на каждом из перечисленных факторов.

Снегазапасы определились, примерно, на 10.03, (максимальные снегозапасы) на полевых маршрутах либо по трем, либо по четырем пунктам, в

которых проводились снегосъемки. Использовать запасы воды в снеге, определенные на лесных маршрутах не представлялось возможным, ввиду ограниченности таких данных.

Осадки учитывались за период с 10 марта до даты схода снега в лесу с 70-80 % залесенной площади. Такой период учета осадков был признан оптимальным в работах О. И. Крестовского[2].

Сумма суточных значений дефицита влажности воздуха позволяет оценить испарение с поверхности речного бассейна в ранний весенний период. П. П. Кузьминым было установлено, что с поверхности снега испарение может быть оценено по формуле

$$E = 0,37 D, \quad (3.1)$$

Где D — сумма суточных значений дефицита влажности воздуха (гПа);

Для оценки испарения в ранний весенний период со смешанной поверхности (снег, почва, вода) А. Н. Постниковым была предложена формула

$$E = 0,44 D. \quad (3.2)$$

Поэтому можно считать, что за весь период весеннего снеготаяния и половодья испарение пропорционально сумме суточных значений дефицита влажности воздуха. Величина D учитывалась за тот же период, что и осадки.

Запасы влаги в первом метровом слое почво-грунтов на конец зимы определялись на полевых участках метеостанций, расположенных как на территории бассейна Кобры, так и на территории соседних бассейнов. Это вызвано тем, что влагозапасы почвы в северной части бассейна р. Вятки определялись по небольшому количеству пунктов. Величина W характеризует степень увлажнения зоны аэрации и должна определять потери воды на восполнение дефицита влаги в зоне аэрации. Дефицитом влаги в данном случае называется величина $(HВ - W)$, где $HВ$ - наименьшая влагоемкость в первом

метровом слое почво-грунтов

Сток с водосбора за ноябрь и декабрь, предшествующих данному половодью косвенно характеризует, как степень увлажнения бассейна в целом, так и запасы грунтовых вод в бассейне перед началом половодья.

Статистические характеристики стокоформирующих факторов, самого стока весеннего половодья и его потерь приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1- Статистические характеристики весеннего половодья р. Кобра

	S	X	Y	P	D	W	Y _{ос}	K _у
Среднее	156	70	140	86	90	341	26	0,62
σ	30	37	53	18	28	30	16	
C _v	0.19	0.53	0.38	0.21	0.31	0.09	0,62	

Примечание. Среднее многолетние значения и - среднеквадратические отклонения (σ) за исключение дефицита влажности воздуха (гПа) даны в мм; K_у- коэффициент стока за половодье.

Данные таблицы показывают, что неизвестные на дату выпуска прогноза величины x и D имеют большие средние и среднеквадратические отклонения, что говорит о значительной изменчивости этих величин от половодья к половодью. При прогнозе стока эти неизвестные на дату выпуска прогноза переменные, обычно заменяются их среднемноголетними значениями, что, при большой естественной изменчивости x и D, будет приводить к большим погрешностям в прогнозе.

Мы попытались прогнозировать сток за половодье двумя способами. В первом случае по данным за 22-х летний ряд устанавливалась зависимость потерь от определяющих факторов. По этой зависимости определялись потери за каждое половодье и затем по уравнению

$$Y=S + X - P \quad (3.4)$$

Определялся сток за каждое половодье.

С помощью программы Excel было получено уравнение множественной линейной регрессии, связывающее потери стока половодья р. Кобры со стокоформирующими факторами за период с 1959 по 1980 гг.

$$P=0.18D - 0.20W - 0.16Y_{oc}. \quad (3.3)$$

Статистические оценки расчета и прогноза стока за половодье с применением этого уравнения приведены в таблице 3.2

Таблица 3.2-- Статистические оценки расчета и прогноза стока половодья р. Кобра по первому методу

Расчет стока			Прогноз стока		
P, %	δ, мм	δ/σ	P, %	δ, мм	δ/σ
100	15	0.28	91	28	0.53

При прогнозе стока вместо неизвестных значений осадков и дефицита влажности воздуха использовались их средние значения, соответственно равные $X=70$ мм и $D=90$ гПа. Полученные оценки показывают, что предлагаемая методика может использоваться в практике прогнозирования стока весеннего половодья на р. Кобра.

Во втором случае сток за весеннее половодья определялся с помощью уравнения множественной корреляции

$$Y = 0,76S + 0,79X = 0,36 W - 159. \quad (3.5)$$

Статистические оценки расчета и прогноза стока за половодье с применением этого уравнения приведены в таблице 3.3

Таблица 3.3- Статистические оценки расчета и прогноза стока половодья р. Кобра по второму методу

Расчет стока			Прогноз стока		
P, %	δ, мм	δ/σ	P, %	δ, мм	δ/σ
100	11	0.21	91	31	0.59

Полученные оценки показывают, что предлагаемая методика может также использоваться в практике прогнозирования стока весеннего половодья на р.

Кобра.

Таблица 3.4-Исходные данные и результаты расчета и прогноза по первому методу

№ эл.	год	s+x	s	x	Д	W	У _{ос}	У _ф	p	У _{рас}	У _{рас} - У _ф	У _{прог}	У _ф - У _{прог}
1	1959	196	131	65	70	304	21	104	92	95	-9	95	9
2	1960	204	166	38	72	310	13	116	88	98	-18	126	-10
3	1961	250	165	85	86	314	7	138	112	140	2	126	12
4	1962	216	170	46	80	402	13	144	72	151	7	174	-30
5	1963	173	160	13	54	347	27	109	64	94	-15	140	-31
6	1964	181	126	55	56	375	31	104	77	122	18	126	-22
7	1965	226	170	56	104	368	34	138	88	136	-2	159	-21
8	1966	237	185	52	62	350	73	158	79	155	-3	165	-7
9	1967	136	85	51	90	320	32	69	67	44	-25	66	3
10	1968	293	175	118	83	352	19	186	107	203	17	154	32
11	1969	186	136	50	76	302	32	94	92	81	-13	99	-5
12	1970	204	124	80	90	370	25	151	53	129	-22	122	29
13	1971	219	145	74	80	368	33	160	59	144	-16	138	22
14	1972	305	199	106	85	345	39	210	95	207	-3	171	39
15	1973	191	149	42	110	328	12	94	97	81	-13	121	-27
16	1974	409	219	190	155	388	52	309	100	302	-7	210	99
17	1975	174	124	50	55	286	9	81	93	71	-10	80	1
18	1976	314	195	119	125	333	13	191	123	193	2	160	31
19	1977	201	142	59	91	350	15	114	87	111	-3	126	-12
20	1978	219	144	75	93	333	28	123	96	122	-1	126	3
21	1979	237	180	57	151	340	34	169	68	141	28	174	5
22	1980	202	140	62	112	320	10	122	80	116	-6	140	18

Таблица 3.5- Исходные данные и результаты расчета и прогноза по второму методу

№ эл.	год	s	W	y_{oc}	y_{ϕ}	y_{pac}	y_{pac} – y_{ϕ}	y_{prog}	y_{ϕ} – y_{prog}
1	1959	131	304	21	104	101	-3	105	1
2	1960	166	310	13	116	109	-7	134	18
3	1961	165	314	7	138	147	9	135	-3
4	1962	170	402	13	144	151	7	170	26
5	1963	160	347	27	109	98	-11	143	34
6	1964	126	375	31	104	115	11	127	23
7	1965	170	368	34	138	147	9	158	20
8	1966	185	350	73	158	149	-9	163	5
9	1967	85	320	32	69	61	-8	76	7
10	1968	175	352	19	186	194	8	156	-30
11	1969	136	302	32	94	93	-1	108	14
12	1970	124	370	25	151	132	-19	124	-27
13	1971	145	368	33	160	142	-18	139	-21
14	1972	199	345	39	210	200	-10	172	-38
15	1973	149	328	12	94	106	12	128	34
16	1974	219	388	52	309	297	-12	202	-107
17	1975	124	286	9	81	78	-3	94	13
18	1976	195	333	13	191	203	12	164	-27
19	1977	142	350	15	114	122	8	130	16
20	1978	144	333	28	123	130	7	126	3
21	1979	180	340	34	169	145	-24	156	-14
22	1980	140	320	10	122	112	-10	118	-4

Заключение

По данным литературных источников в настоящей работе подробно рассмотрены основные факторы и условия формирования весеннего стока и его потерь в различных природных зонах. Особое внимание при этом было уделено лесной зоне, где находится объект наших исследований — водосбор реки Кобры (бассейн реки Вятки).

При разработке методики прогноза мы исходим из представлений О. И. Крестовского [14] о том, что в бассейне реки Вятки потери стока весеннего половодья складываются из затрат воды на пополнение влагозапасов в зоне аэрации, пополнение грунтовых вод и на испарение. В соответствии с этим, факторами, определяющими потери считались: запасы влаги в первом метровом слое почво-грунтов (W); сток реки Кобры за ноябрь и декабрь предыдущего года (y_{oc}); сумма среднесуточного значения дефицита влажности воздуха за период снеготаяния и половодья (D). Для прогноза стока половодья реки Кобры предложено два варианта, расчетно-прогностических уравнений.

В первом варианте методики прогноза строилось уравнение множественной линейной регрессии, связывающее потери стока половодья с дефицитом влажности воздуха, запасами влаги почве и стоком за ноябрь и декабрь предыдущего года. При прогнозе вместо неизвестных на дату выпуска прогноза значений осадков и дефицита влажности воздуха подставлялись, как обычно в таких случаях, их среднемноголетние значения. Статистические оценки этой методики ($\delta/\sigma = 0,53$ и $P = 91\%$) позволяют оценить ее как удовлетворительную и пригодную для практического использования. Во втором варианте методики была предпринята попытка построить прогностическое уравнение, связывающее сток за половодье со снегозапасами, осадками за половодье и запасами воды в почве. Обеспеченность метода прогноза здесь составила также 91%. Вторая оценка методики прогноза хотя и оказалась несколько ниже, чем в первом случае, но также является

удовлетворительной: $\delta/\sigma = 0,59$. Вторая методика также может считаться удовлетворительной и быть рекомендованной для практического использования.

Список использованных источников

1. Алексеев Г.А. Объективные методы выравнивания и нормализации корреляционных связей. —Л.:Гидрометеиздат,1971.-363с.
2. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. - Л.: Гидрометеиздат, 1974.
3. Бажин Н.А., Калюжный И.Л., Новикова Н.Ф. Фильтрационные свойства почв бассейна р.Вятки. - Труды ГГИ, 1980, вып.268, с. 58-71.
4. Вершинина Л.К. Анализ зависимости объема весеннего стока рек бассейна р. Дона от обуславливающих факторов. - Труды ГГИ, 1974, вып.218, с.45-71.
5. Вершинина Л.К., Белова Л.Б. Оценка случайных ошибок измерения и погрешностей интерполяции характеристик снежного покрова и твердых осадков. - Труды ГГИ, 1974, вып.214, с.3-29.
6. Вершинина Л.К.. Крестовский О.И. О выборе типичных небольших водосборов для исследования и расчета весеннего стока с крупных речных бассейнов. - Труды ГГИ, 1974, вып. 218, с.132-144.
7. Вершинина Л.К., Волченко В.И. Распределение запасов воды в снежном покрове в северо-восточных районах ЕТС. — Труды ГГИ, 1979, вып.259, с 58-67.
8. Вершинина Л.К.. Крестовский О.И. О выборе типичных небольших водосборов для исследования и расчета весеннего стока с крупных речных бассейнов. - Труды ГГИ, 1974, вып. 218, с.132-144.
9. Вершинина Л.К., Крестовский О.И. Методические рекомендации по определению потерь талых вод при прогнозах стока половодья равнинных рек ЕТС. — Труды ГГИ, 1982.
- 10.Деребизова С .Б. Определение дат схода снежного покрова в лесу. - Труды ГГИ, 1974, вып. 214, с 61-69.
11. Калюжный И.Л., Павлова К.К. Формирование потерь талого стока. - Л., Гидрометеиздат, 1981, с 160.
12. Крестовский О.И. Исследование стока и водного баланса водосборов. -

Труды ГГИ, 1969, вып.176, с.22-50.

13. Крестовский О.И. Принципы оценки и прогноза потерь весенних вод на водосборах Северо-Запада ЕТС. - Труды ГГИ, 1972, вып.194, с.46-61.

14.Крестовский О.И. Расчет и прогноз объема стока весеннего половодья р.Вятки. - Труды ГГИ, 1977, вып. 233, с. 15-26.

15.Крестовский О.И., Соколова Н.В. Весенний сток и потери талых вод в лесу и поле. - Труды ГГИ, 1980, вып.265, с.32-60.

16.Крестовский О.И., Постников А.Н., Сергеева А.Г. Определение испарения с водосборов Северо-Запада ЕТС для расчета и прогноз потерь воды в весенний период. - Труды ГГИ, 1974, вып.214, с.84-105.