



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрофизики и гидропрогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему **Разработка методики прогноза
уровней воды в водоеме (на
примере озера Ильмень)**

Исполнитель Григорьевская Светлана Витальевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат технических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Викторова Наталья Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

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

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«30» мая 2017 г.

Санкт-Петербург
2017



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

Кафедра гидрофизики и гидропрогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему **Разработка методики прогноза
уровней воды в водоеме (на
примере озера Ильмень)**

Исполнитель

Григорьевская Светлана Витальевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

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

Викторова Наталья Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

**«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой**

(подпись)

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

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 2017 г.

Санкт–Петербург
2017

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Введение

- 1 Физико-географическое описание бассейна озера Ильмень
 - 1.1 Географическое положение и рельеф
 - 1.2 Почвенный покров
 - 1.3 Растительность
 - 1.4 Климатическая характеристика
 - 1.4.1 Температурный режим
 - 1.4.2 Режим осадков
 - 1.5 Гидрография
 - 1.6 Гидрологический режим
- 2 Долгосрочные прогнозы стока рек и притока воды в водохранилища в период межени
 - 2.1 Источники питания и составляющие меженного стока
 - 2.2 Уравнение истощения и определение его параметров
 - 2.3 Виды и методика долгосрочных прогнозов стока и уровней воды в период межени
 - 2.4 Прогнозы сезонного меженного стока и его распределение во времени
 - 2.5 Прогнозы месячного стока по данным о предшествующих расходах воды
 - 2.6 Прогнозы стока по данным о запасе воды в русловой сети и осадкам
 - 2.7 Прогнозы средних и минимальных месячных уровней воды
- 3 Динамические модели формирования стока и их использование в прогнозах
 - 3.1 Общее представление о системном моделировании
 - 3.2 Модель замкнутого водоема

- 3.3 Модель склонового стока
- 4 Поверочные прогнозы расходов воды в летне-осенний период на притоках озера Ильмень
 - 4.1. Исходные данные
 - 4.2 Численное решение модели склонового стока
 - 4.3 Параметризация динамической модели склонового стока
 - 4.4 Поверочные прогнозы расходов воды
- 5 Прогноз уровней озера Ильмень
 - 5.1 Исходные данные
 - 5.2 Параметризация динамической модели водоема

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Приложение А. Среднемесячные расходы воды

Приложение Б. Результаты корреляционного анализа

Приложение В. Результаты параметризации модели склонового стока

Приложение Г. Фактические и прогнозные гидрографы стока основных притоков озера Ильмень

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования является озеро Ильмень, которое представляет собой мелководный водоем. В прибрежной зоне его глубина не превышает 3 – 4 метра, а в центральной части – 6 – 10 метров. Берега озера очень пологие, заболоченные, что приводит к их затоплению при подъеме уровней, в результате чего площадь озера сильно колеблется. При высоких подъемах уровня площадь зеркала увеличивается почти в три раза. Еще одной отличительной особенностью озера является большая амплитуда колебаний уровня, достигающая за многолетний период около 7 метров. Такая амплитуда является необычной для озер. Это объясняется тем, что площадь самого озера по сравнению с площадью водосбора очень невелика.

Такие особенности озера приводят к тому, что даже при несущественных изменениях уровня воды затоплению подвергаются значительные территории. Поэтому долгосрочный прогноз уровней воды озера представляется актуальной и важной задачей.

В настоящее время разработано довольно много методов прогнозирования уровней воды. В данной работе использовались методы, в основе которых лежат математические модели в виде дифференциальных уравнений. Математические модели позволяют осуществлять расчет и прогноз расходов воды на притоках и уровней озера. На кафедре гидрофизики и гидропрогнозов проводилась апробация моделей для целей краткосрочного прогнозирования. В частности, для всех основных притоков озера Ильмень была разработана методика краткосрочного прогноза расходов воды, а также была разработана методика краткосрочного прогноза уровней озера. Однако для долгосрочных прогнозов, заблаговременность которых превышает 15 суток, разработки методики и широкой апробации не проводилось.

Целью данного исследования является разработка методики долгосрочного прогноза уровней воды, в основе которой лежит системная матема-

тическая. Поскольку уровень воды в озере определяется расходами притоков, разработка методики включает в себя и этап прогнозирования расходов воды.

Основными задачами являются:

- 1) сбор исходной гидрологической информации об уровнях озер и расходов воды на его притоках;
- 2) сбор исходной метеорологической информации (сведений об атмосферных осадках, температуре воды, влажности воздуха и др.);
- 3) параметризация динамической модели склонового стока для целей долгосрочного прогноза расходов воды на основных притоках озера Ильмень;
- 4) выпуск поверочных прогнозов расходов воды;
- 5) параметризация динамической модели водоема;
- 6) выпуск поверочных прогнозов озера Ильмень с целью оценки эффективности методики.

Актуальность данного исследования заключается в том, что заблаговременная оценка уровней воды Озера Ильмень позволит оценить масштабы затопления и принять меры для предотвращения или минимизации ущерба.

Новизна исследования заключается в том, что для озера Ильмень в основном выпускаются краткосрочные прогнозы. Кроме того, прогнозы выпускаются преимущественно в период половодья. В основе применяемых методов лежат статистические зависимости. В данной работе предлагается использовать метод математического моделирования.

Достоверность полученных результатов подтверждается проверкой всех прогнозов с использованием критериев, рекомендованных Росгидрометом и принятых в отделах прогнозов управлений по гидрометеорологии и охране окружающей среды.

1. Физико-географическое описание бассейна озера Ильмень

1.1 Географическое положение и рельеф

Озеро Ильмень располагается на территории Новгородской области. В границах области располагаются морено-холмистая возвышенность (Валдайская возвышенность и Витебско-Невельская гряда), Валдайский уступ и пониженная Приильменная равнина.

Пологоволнистый характер имеет поверхность бассейна озера Ильмень. На Приильменскую низменность (около 18 м над уровнем моря) приходятся самые низкие места, на Валдайскую возвышенность – самые высокие (около 300 м над уровнем моря). В целом преобладают высоты от 50 до 200 м над уровнем моря.

Низменность, появившаяся на западе, сложилась преимущественно мереглями, рыхлыми и пестро-окрашенными песчано-глинистыми породами. Из твердых известняков и плотных глин состояло возвышенное плато на востоке. В сторону низменности, на запад, плато обрывалось уступом. Валдайский уступ выражен в современном рельефе в некоторых местах. Он отделяет Приильменскую низменность от Валдайской возвышенности. Древние палеозойские отложения часто выходят на поверхность по берегам рек и озер, залегают сравнительно неглубоко. Таким образом, Валдайская возвышенность и Приильменская низменность сформировались в кайнозойскую эру, до того времени, когда наступили ледники [1].

Ледники, наступившие на Восточно-Европейскую равнину - одно из основных событий кайнозойской эры. Валдайское оледенение имело наибольшее значение для Новгородской области. Толстый слой моренных отложений, таких как суглинков, песков и супесей, оставил за собой ледник. Материал морены сильно перемешан, содержит много валунов из кристаллических пород, принесенных льдом с севера. Моренные отложения в форме хол-

мов наиболее характерны для рельефа области. Крупные моренные холмы имеют относительные высоты 50 – 60 м, средние – 10 – 30 м, мелкие – 5 – 10 м. Плоские участки, сложенные валунными суглинками, могут встретиться среди холмистого мореного рельефа. Моренные равнины, так называемые данные участки, преобладают на Приильменской низменности.

В пределах Валдайской возвышенности, мореный рельеф лучше всего сохранился. Отложение принесенного им материала произошло на краю ледника. Камы – округлые холмы, сложенные мелкозернистыми песками, сформировались в толще ледника.

Часто встречаются озы - длинные крутосклонные гряды, сложенные гравием и песками и называющиеся хребтами. Внешне озы напоминают железнодорожные насыпи. В результате заполнения трещин во льду отложениями водных потоков сформировались озы. Выносы ледниковых рек образовали зандры – песчаные равнинные пространства, которые обычно покрыты сосновыми лесами. В восточных районах Новгородской области они занимают наибольшую площадь. Высоты Приильменской низменности колеблются от 18 до 50 м над уровнем моря.. В месте расположения озера Ильмень наиболее понижена центральная часть. В Ильмень впадают многочисленные реки: Шелонь, Ловать, Мста и другие. Волхов – единственная река, впадающая в Ладожское озеро, берет начало из озера Ильмень.

Сильно заболочена поверхность Приильменской низменности. Реки, текущие по ней, имеют неглубокие долины, а озера – невысокие берега. Единственный берег озера Ильмень – южный - высокий (до 16 м). На несколько километров заливаются во время половодья западный, северный и восточный берега.

На хозяйственную деятельность населения области оказывает влияние рельеф. Сильно заболочена плоская поверхность Приильменской низменности. Немало валунов на холмистой Валдайской возвышенности, представляющие серьезное препятствие для земледелия. Здесь пахотные земли нуждаются в очистке от валунов. Наблюдается смыв почв дождевыми и талыми

водами на крутых склонах. Это учитывают при распашке поля, расположенные на холмах, распахивают поперек склона [1].

1.2 Почвенный покров

Бассейна озера расположен в лесной зоне, где количество атмосферных осадков превышает испарение влаги с поверхности почвы, а преобладающими типами почвообразования являются подзолистый, дерновый и болотный. Поэтому для области характерно развитие дерново-подзолистых и болотных почв, а также переходных между ними разностей. На молодых террасах рек Мсты, Ловати, Волхова и др. развиты аллювиальные почвы.

В целом почвенный покров области характеризуется большой пестротой, что связано с сильным расчленением холмисто-мореного рельефа, большим разнообразием материнских пород, различиями растительного покрова и неодинаковым увлажнением территории.

Значительные территории покрыты лесами, большие площади занимают болота, преимущественно верховые.

В поймах рек и озер распространены аллювиальные почвы. Они обычно затопляются во время половодий и в связи с этим все время пополняются новыми речными отложениями. Суглинистые и супесчаные аллювиальные почвы богаты питательными веществами и не имеют подзолистого горизонта. В связи с весенним затоплением на этих почвах возможны посевы только яровых и огородных культур. Чаще всего они заняты лугами. Наиболее широко развиты аллювиальные почвы в пойме реки Волхова, в дельтах Мсты, Ловати, Полы и по берегам озера Ильмень [1].

1.3 Растительность

Территория бассейна расположена в основном в южной подзоне тайги; лишь небольшая северо-восточная часть ее находится в подзоне средней тай-

ги, а крайняя юго-западная – в зоне смешанных лесов. Наиболее характерны темнохвойные (еловые) леса, покрывавшие в прошлом большую часть территории Северо-Запада. Они приурочены к водоразделам с суглинистыми и частично супесчаными почвами. Широко распространены заболоченные еловые леса (сфагновые ельники). Сосновые леса в основном произрастают на более легких песчаных и супесчаных почвах.

Состав лиственных лесов представлен, главным образом, мелколиственными породами (березой, осиной, ольхой). На юго-западе значительна примесь широколиственных пород. По побережью Финского залива и по рекам Волхов и Луга встречаются небольшие дубравы.

На площадях, занятых лесной растительностью, складываются своеобразные физико-географические условия. Почвы здесь меньше промерзают и обладают большей водонепроницаемостью. Таяние снега протекает медленнее, вследствие чего на реках не наблюдается быстрых и бурных половодий, поверхностный сток весной в лесу меньше, чем на открытых пространствах, зато летом реки провинций лесной зоны обычно сохраняют полноводность.

1.4 Климатическая характеристика

Общий характер климата Новгородской области определяется географическим положением ее территории, расположенной в умеренных широтах на северо-западе Русской равнины, в сравнительной близости от крупных водоемов. Широтные различия северных и южных районов незначительны.

1.4.1 Температурный режим

Температурный режим определяется поступлением солнечного тепла в течение года. Это зависит, прежде всего, от изменения продолжительности дня и высоты полуденного солнца над горизонтом в разные сезоны года.

Продолжительность дня в районе колеблется от 18 часов в июне до 6 часов в декабре.

Интенсивное поступление солнечного тепла наблюдается в период май – август, и наоборот, наименьшее количество поступления его в период с октября по февраль.

Новгородская область находится в зоне умеренного континентального климата, который формируется под влиянием морских воздушных масс Атлантики и отличается повышенной влажностью, сравнительно теплой зимой и прохладным летом. Средняя температура января – минус 7 °С, июля – плюс 14 °С. Вегетационный период составляет 120 – 130 дней.

Самым холодным месяцем является январь, средняя температура его составляет минус 8.7 °С. Для зимнего периода характерны оттепели, при которых температура днем повышается до минус 4 – 7 °С, что вызывает интенсивное таяние снега, а иногда почти полное его исчезновение.

Самым теплым месяцем является июль, месячная температура которого составляет плюс 17 °С. В отдельные ясные дни температура воздуха повышается до 32 – 34 °С.

1.4.2 Режим осадков

Новгородская область, в которой преимущественно расположен бассейн озера Ильмень, получает достаточное, даже избыточное количество влаги. Из-за особенностей рельефа осадки распределяются неравномерно. Самое большое годовое количество осадков выпадает на западных склонах Валдайской возвышенности – до 800 мм в год. На Приильменской низменности выпадает 600 – 700 мм. Менее всего осадков у озера Ильмень и в долинах Ловати, Волхова, Мсты.

В течение года осадки распределяются также неравномерно. В теплый период года (с апреля по октябрь включительно) осадков выпадает в 2 – 2.5

раза больше, чем в холодный период. Максимум осадков приходится на лето, хотя дождливых дней больше осенью. Летом дожди сильные и обильные, часто с грозой, а осенью – мелкие, морозящие. Весна – самое сухое время теплого периода. Зимой осадков еще меньше, они приносятся циклонами. К концу зимы накапливается снежный покров высотой около 50 см на севере области и 30 см – на юге.

Осадков выпадает больше, чем расходуется влаги на испарение и сток, поэтому имеется много заболоченных земель. Особенно это характерно для Приильменской низменности, где средняя годовая испаряемость составляет 400 – 450 мм, коэффициент увлажнения 150 – 200%.

1.5 Гидрография

Реки Новгородской области по их режиму относятся к восточноевропейскому типу. Для них характерны преобладание снегового питания и значительные половодья весной. Иногда наблюдаются подъемы воды в осеннее время, при условии длительных дождей. Наиболее значительный сток осуществляется во время половодья.

Большинство рек, впадающих в озеро Ильмень, имеет довольно обширные дельты.

Река Мста

Река Мста является одним из крупнейших притоков оз. Ильмень. Начало свое она берет в северной части оз. Мстино и впадает в озеро Ильмень несколькими рукавами недалеко от истока реки Волхов. Длина реки составляет 445 км, площадь водосбора – 23060 км².

Бассейн реки Мсты почти целиком расположен в северной части Валдайской возвышенности и занимает территорию так называемого «Поозерья». Для бассейна характерен типичный моренный ландшафт. Поверхность бассейна покрыта многочисленными холмами. Юго-западная часть, где проходит основная гряда Валдайских гор, и северная часть бассейна (Шерехов-

ские высот), являются наиболее возвышенными, их высота на уровне озера Ильмень может достигать 250 – 300 метров. К югу и востоку местность понижается, переходя в Валдайское озерное плато и Молого-Мстинскую озерную возвышенность. Нижний участок реки, длиною около 40 км, расположен в Волховско-Ильменской впадине, представляющей собой заболоченную низину, полого поднимающуюся к верховьям реки. Далее вверх по течению реки простирается Валдайская возвышенность.

Наиболее крупными притоками реки Мсты являются реки Цна, Березайка, Уверь. Река Мста приблизительно до середины XIX века играла видную роль как транспортный водный путь. Она входит в состав Вышневолоцкой водной системы. В последние годы по реке производилось лишь мелкое судоходство и сплав леса плотами. Питание реки Мсты улучшено путем устройства большого числа искусственных водохранилищ, что в свою очередь повлияло на естественный режим реки.

Основными гидротехническими сооружениями в бассейне реки Мсты являются системы Заводского и Мстинского водохранилищ.

По естественному режиму река Мста принадлежит к типу равнинных рек с преобладающим снеговым питанием. Однако в связи с зарегулированием стока верховыми водохранилищами естественный режим реки подвергается некоторым искажениям.

Весенний подъем уровней обычно сопровождается вскрытием реки, происходящим в середине апреля. Спад уровней по времени сильно растягивается, причем это удлинение происходит благодаря искусственным попускам воды из водохранилищ.

Река Ловать

Река Ловать вытекает из озера Ловатец и впадает в озеро Ильмень, являясь его вторым по величине после реки Мсты притоком. Бассейн реки имеет вытянутую форму и примыкает к озеру Ильмень с юга, располагаясь в понижении между отрогами Валдайской и Невельско-Витебской возвышенно-

стей. Юго-восточную границу бассейна составляют отроги Валдайской возвышенности – Ревеницкие горы, а юго-западную – отроги Невельско-Витебской возвышенности – Вязовские и Беженицкие высоты. Длина реки, по данным Волховстроя, составляет 536 км, площадь водосбора – 21 900 км².

По характеру поверхности бассейн реки Ловать можно разделить на две основных части. К югу от линии, проходящей примерно через озеро Пылец – г. Великие Луки, расположена повышенная часть бассейна с преобладающими моренными формами рельефа. К северу от этой линии простирается пониженная часть бассейна. Общее падение реки составляет 0.28 м на 1 км, средний уклон составляет 0.29 ‰.

Переход от возвышенной части бассейна к равнинной выражен чрезвычайно резко, что объясняется совпадением границ равнинной части с границей древнего понижения озера Ильмень. Равнинная часть бассейна, в свою очередь, может быть разбита на три зоны, имеющие свои морфологические особенности. По правому берегу реки Ловати расположена возвышенная, хорошо дренированная сетью притоков, незаболоченная зона. Левобережная часть реки сильно заболочена и имеет слаборазвитую речную сеть.

В бассейне реки Ловати насчитывается около 500 озер с общей площадью зеркала около 409 км².

Годовой ход уровней выглядит следующим образом: после низких зимних уровней начинается резкий подъем их и в течение 5 – 10 дней наступает максимум. Ход уровней в летне-осенний период обуславливается выпадением атмосферных осадков. Основным источником питания р. Ловати являются атмосферные осадки.

Река Шелонь

Река Шелонь берет начало в заболоченной местности, в 2 км к юго-западу от д. Новая Слобода, и впадает в западную часть озера Ильмень. По своей величине река является третьей среди рек Волховского бассейна, уступая лишь Мсте и Ловате. Длина реки составляет 253 км, площадь водосбора 9850 км².

Бассейн реки Шелонь расположен к западу от озера Ильмень. Возвышенная северо-западная часть бассейна, хотя и имеет небольшие отметки, быстро переходит в равнинную, частично заболоченную низменность с отдельными всхолмлениями. Высоты восточной и юго-восточной части бассейна достигают на водоразделе 70 – 80 м абс. Здесь в границы бассейна реки Шелони вступают низменности, образующие водораздельные болота между бассейнами рек Полисть и Шелонь. Водосбор реки по своей форме представляет прямоугольник, удлинённый в направлении с юго-запада на юго-восток и несколько суженный к низовью. Нарастание площади водосбора происходит равномерно.

Общая длина речной сети в бассейне реки Шелонь составляет 2837 км. Общее падение реки составляет 92 м, а средний уклон – 0.36 ‰. Русло реки сильно извилисто, коэффициент извилистости равен 2.46.

Весь устьевой участок реки Шелони и устьевые участки ее нижних притоков находятся под влиянием подпора воды озера Ильмень.

По характеру питания река Шелонь относится к равнинным рекам, получающим основное количество воды за счет весеннего снеготаяния, обуславливающего весенний максимум расхода и уровня воды. Второй максимум наблюдается осенью, в период обложных дождей.

Подъем уровней весной начинается обычно в конце марта и продолжается 10 – 12 дней. Межень наступает в июне и продолжается до сентября. Осенние паводки начинаются обычно в конце сентября и продолжаются вплоть до появления на реке ледовых образований. Уровни зимнего периода неустойчивы, постоянно нарушаются значительными подъемами, вызываемыми заторными явлениями.

Река Пола

Река берет начало из болот, расположенных в 6 км к северу от д. Никифоровки и впадает в озеро Ильмень восточнее реки Ловати. Длина реки составляет 258 км, площадь водосбора 7450 км².

Бассейн реки Полы асимметричен: река проходит вблизи западной линии водораздела; вся правобережная, восточная часть бассейна развита за счет притоков – рек Явони и Поломети. На долю левобережной части приходится около 20%, а правобережной – около 80% площади водосбора. Верховья реки расположены на северо-западном склоне Ревенецких гор, поросших лиственным лесом. Долина реки разработана слабо, ширина ее не превышает 50 м, пойменные участки отсутствуют. Склоны долины крутые, в обнажениях берега выступают моренные суглинки, сменяющиеся ниже по течению песками. В русле реки много валунов, способствующих образованию перепадов.

Ход уровней реки Полы является типичным для равнинных рек Европейской территории РФ и характеризуется двумя резкими подъемами воды, происходящими в результате весеннего таяния снега и осенних дождей, и двумя периодами низких уровней – зимой и летом, причем летом наблюдаются довольно частые дождевые паводки.

Весенний подъем уровня происходит весьма интенсивно обычно во второй половине марта или в начале апреля. Весеннее половодье продолжается от 1.5 до 2.5 месяца. Пик половодья в верхнем течении реки Пола обычно бывает один, а ниже впадения основных притоков иногда наблюдается два пика. Период летней межени продолжается в течение 4 – 5 месяцев.

Река Полисть

Река берет начало из болот и впадает в реку Ловать с левого берега, на 14.5 км от ее устья. Это второй по величине приток реки Ловати. Ее водосбор составляет 16% от площади всего бассейна Ловати. Длина реки составляет 173 км, площадь водосбора 3490 км². Река имеет небольшие уклоны продольного профиля и сравнительно спокойный характер течения. Южная часть ее бассейна изобилует озерами: Полисто – 27.9 км², Дубец – 12.4 км², в связи с этим озерность всего бассейна, несмотря на небольшое число озер,

расположенных в среднем и нижнем течении реки, достигает 2.4%. Почти весь бассейн лежит в пределах обширной болотистой низины, примыкающей к озеру Ильмень с южной и юго–западной стороны и представляющей в некоторой своей части дно древней озерной котловины. Ландшафт бассейна обуславливает сравнительно небольшие значения густоты речной сети (0.26 км на 1 км²) и коэффициента извилистости (1.69). Основным притоком реки Полисти является река Порусье, впадающая в нее у г.Старая Русса [2].

Озеро Ильмень

Озеро Ильмень – самый крупный по площади водоем в Новгородской области. По своим размерам Ильмень занимает шестое место среди всех озер Северо-Запада России. Расположено озеро Ильмень в центральной части Приильменской низины, на дне девонского прогиба. По форме озеро напоминает треугольник, вершинами которого являются: на севере – истоки реки Волхов, на юго-западе – устье реки Шелони, на юго-востоке – Ситецкий залив. Длина озера, при среднем уровне воды, достигает 48 км, а ширина его доходит до 35 км. Средняя длина береговой линии составляет 176 км. Озеро Ильмень – обширный, но мелководный водоем. В связи с тем, что колебания уровня озера весьма значительны, а берега очень пологи, величина площади озера, очертания его берегов и объем воды часто меняются.

При высоком уровне низкие берега бывают затоплены до июля – августа, после чего начинается медленный спад воды. Особенно сильно затопляются берега в дельтах рек Мсты и Ловати. Всего в озеро Ильмень впадают 52 реки; многие из них образуют широкие поймы, служащие удобными местами для нереста и нагула рыб.

Общее протяжение всех притоков Ильменя достигает 6800 км. Площадь бассейна оз.Ильмень – 67300 км². Большая часть ее относится к водосборам четырех главных притоков: Мста, Ловать, Шелонь, Пола. Сток из озера происходит в реку Волхов, на которой в 1928 г. построена плотина Волховской ГЭС. На прилегающей к Ильменю территории разбросано около

70 небольших пойменных озер общей площадью 8400 га. Многие из этих озер протоками соединяются с Ильменем.

Сроки замерзания и вскрытия Ильменя очень сильно колеблются, что во многом зависит от режима притоков Ильменя. За последние полвека в среднем замерзание наступает 20 ноября, но бывают годы, когда замерзание озера начинается 27 октября, а иногда только 20 декабря. Замерзание озера при сильных ветрах приводит к образованию торосов и наледей.

Вскрытие озера в среднем происходит 28 апреля, хотя бывают случаи вскрытия озера на месяц раньше или на три недели позже. В соответствии с этим и длительность подледного периода колеблется от 129 до 185 дней (при среднем периоде – 158 дней).

Подъем уровня озера наблюдается в период таяния снегов в конце марта начале апреля. Наивысший уровень, достигаемый в конце апреля, держится недолго, но спад воды, начинающийся вскоре, протекает потом очень медленно, вплоть до сентября месяца. Кроме того, уровень Ильменя быстро реагирует на паводки, возникающие на реках его бассейна.

1.6 Гидрологический режим

Реки. Все реки Северо–Запада принадлежат к типу равнинных рек, для которых характерно смешанное питание с преобладанием снегового. В годовом ходе уровня воды четко выражены четыре фазы: весеннее половодье, летнее–осенняя межень, почти ежегодно нарушаемая дождевыми паводками, затем короткий осеннее–зимний период с несколько повышенной водностью рек, далее устанавливается зимняя межень, в некоторые годы прерываемая подъемами уровней в периоды оттепелей; чаще подъем уровней вызван подпором от зажорных явлений.

Распределение весеннего (снегового), дождевого и грунтового стока в году находится в прямой зависимости от физико-географических факторов:

рельефа, характера почво-грунтов, распределения по территории осадков, геологического строения местности.

Весеннее половодье на большей части Северо–Запада начинается почти одновременно: на юге, юго–западе территории (бассейны рек Великой, Шелони, Плюссы, Ловати) в третьей декаде марта, на остальной части – в первой декаде апреля.

Средняя продолжительность подъема половодья составляет 10 – 20 дней, как для средних, так и для крупных рек. В зависимости от характера весны продолжительность подъема весеннего половодья может изменяться от 6 до 52 дней.

Средняя интенсивность подъема весеннего половодья по территории составляет 22 см/сутки, но в зависимости от дружности весны, особенностей местных условий она может колебаться в больших пределах, как по территории, так и от года к году.

На больших реках подъем проходит более интенсивно, чем на средних и малых. На средних реках максимальная интенсивность подъема 33 – 75, а на малых – 28 – 40 см/сутки.

В основном для рек Северо–Запада характерна одна волна половодья, форма гидрографа одновершинная. Однако большое влияние на форму гидрографа оказывают метеорологические условия в период формирования половодья. В поздние весны при дружном снеготаянии половодье наиболее высокое, а ранние мягкие весны происходят постепенное стаивание снега, половодье бывает обычно низкое.

В формировании весеннего половодья помимо талых вод участвуют дожди, доля которых в объеме половодья невелика (2 – 5 % суммарного стока). Основная доля стока половодья формируется талыми водами. Величина грунтового стока незначительна и составляет примерно 5 – 15%.

Общая продолжительность весеннего половодья в среднем составляет 55 – 65 дней, наибольшая 89 – 105 дней. Причиной увеличения общей про-

должительности половодья может служить напластывание на него дождевых паводков.

Летнее–осенняя межень обычно наступает в начале – середине июня и заканчивается в октябре.

Роль зимних паводков в режиме рек Северо–Запада невелика. Более характерными для этих рек являются подъемы уровней воды за счет подпоров от зажоров, которые имеют место на большинстве рек, независимо от размеров последних.

Озера. Большинство озер Северо–Запада ледникового происхождения. Питание их происходит в основном за счет поверхностного стока, который осуществляется через сеть его притоков. Лишь на ряде озер доминирующим является грунтовое, ключевое или болотно–фильтрационное питание.

Годовая амплитуда колебания уровней на этих озерах составляет 20 – 50 см.

Основной частью водного баланса озер Северо-Запада, как в приходной, так и в расходных частях, является сток. Потери на испарение невелики. В осенний период существенную роль в питании озер играют атмосферные осадки, поэтому для большинства озер характерно наличие двух максимумов и двух минимумов.

В годовом ходе уровней наблюдается подъем в период стока талых вод.

Подъем начинается обычно в первой половине апреля и достигает максимума в конце апреля – первой половине мая. Спад весенних вод в основном плавный и зависит от пропускной способности русла вытекающей из озера реки и от подъема воды в озере.

Осенний дождевой подъем наблюдается в октябре – ноябре. Минимум уровня, наступающий после половодья, обычно выше абсолютного годового наивысшего уровня.

Питание озера Ильмень зависит от поверхностного стока. Величина среднего годового уровня обусловлена главным образом осадками, выпадающими на водосбор, причем наличие в бассейне большого количества бо-

лот и озер способствует задержанию влаги и создает естественные условия зарегулирования поверхностного стока.

Нормальный годовой ход уровня озера характеризуется весенним подъемом, растянутым от апреля до июля.

1.7 Гидрометеорологическая изученность

Систематические наблюдения за уровнями и расходами воды на реках начаты в 19 веке и ведутся до настоящего времени. Первые водомерные посты были открыты на реках Волхов и Мста. Активное изучение рек начато уже после Великой отечественной войны.

Число пунктов, имеющих длительный период наблюдений достаточно велико. Число створов, где сток учитывается более 40 лет, составляет 40% от общего их числа. Из представленных 65 постов – 34 являются действующими, 41 из представленных постов имеют период наблюдений свыше 50 лет. На рисунке 1.1 приведена схема расположения действующих и закрытых гидрологических постов. В таблице 1.1 представлена информация о гидрологической изученности района. В таблице приведены сведения о пунктах с достаточно большой продолжительностью наблюдений.

Как видно из таблицы, на рассматриваемой территории расположено 7 % рек с площадью водосбора более 20 тыс.км², 38 % – площадь водосбора которых находится в диапазоне от 1000 до 20000 км², а остальные – с площадью водосбора менее 1000 км².

Таблица 1.1 – Основные сведения о гидрологических постах

№ на рис.1.1	Река	Пост	F, км ²	Расстояние от устья	Период на- блюдений
1	Волхов	г. Новгород	67500	216	1877
Бассейн р.Мсты					
2	Мста	с.Березовский Рядок	5180	390	1914-1997
3	Мста	пос.Потерпелицы	13200	312	1877
4	Мста	д.Бор	16900	221	1934-1993
5	Мста	с.Девкино	22500	84	1923
6	Мста	д.Полосы	22900	58	1978-1985
7	Мста	с.Бронница	23000	26	1944
8	Цна	с.Жилотково	1460	38	1931
9	Шлина	д.Годыши	1320	60	1954-1994
10	Березайка	с.Ильятино	477	107	1959-1978
11	Березайка	д.Устье	3030	29	1948-1999
12	Уверь	с.Устрека	1030	90	1964-1978
13	Уверь	д.Меглицы	1750	51	1937
14	Съежа	д.Стан	400	103	1926
15	Круппа	д.Сутокский Ря- док	42.8	28	1959-1994
16	Вельгия	д.Междуречье	184	32	1960
17	Голоховка	д.Междуречье	67.6	0.3	1958-1994
18	Быстрица	д.Новоселицы	40.4	7.8	1958-1994
19	Шегринка	пос.Красный Мост	188	47	1960-1986
20	Перетна	пгт Кулотино	795	22	1954-1991
21	Охомля	д.Родники	73.1	10	1959-1986
22	Мда	д.Бахариха	550	21	1943-1976

Продолжение таблицы 1.1

№ на рис.1.1	Река	Пост	F, км ²	Расстояние от устья	Период на- блюдений
23	Мда	д.Большое Забо- ровье	619	9.4	1976
24	Веребушка	с.Оксочи	86.3	40	1946-1994
25	Оксочка	с.Оксочи	1.83	0.2	1960-1986
26	Оксочка	с.Оксочи	6.81	1	1954-1987
27	Холова	д.Горбуново	1500	34	1941-1991
28	Мошня	д.Невская	688	1.9	1960-1987
29	Хуба	д.Ольховец	323	14	1950-1994
Бассейн р.Полы					
30	Пола	д.Новый Ново- сел	1900	154	1949-1995
31	Пола	д.Налючи	6740/6450	68	1936
32	Явонь	д.Малые Луки	867/576	20	1329
33	Полометь	д.Дворец	432	114	1936
34	Полометь	д.Яжелбицы	631	98	1932
35	Полометь	д.Соменка	776	76	1959
36	Лонница	д.Мосолино	48.3	0.8	1934
Бассейн р.Ловати					
37	Ловать	д.Узкое	398	489	1933
38	Ловать	г.Великие Луки	3270	355	1928
39	Ловать	д.Сельцо	8230	261	1929-1987
40	Ловать	г.Холм	14700	193	1911
41	Ловать	пгт Парфино	17500	34	1932-1987
42	Ловать	с.Взвяд	21800	7.5	1877
43	Насва	д.Гороховье	1080	15	1956-1987
44	Локня	д.Бородино	398	60	1928

Продолжение таблицы 1.1

№ на рис.1.1	Река	Пост	F, км ²	Расстояние от устья	Период на- блюдений
45	Кунья	д.Уварово	2480	70	1933
46	Кунья	г.Холм	5140	2.6	1930
47	Ока	д.Борок	310	8.2	1932
48	Большой Тудер	с.Бабяхино	871	5	1932
49	Редья	д.Чернышево	469	51	1935-1985
50	Редья	д.Давыдово	542	29	1985
51	Полисть	д.Коробинец	1160	127.7	1935-1985
52	Полисть	д.Подтополье	2150	37	1934-1987
53	Полисть	д.Утушкино	1450	19	1987
54	Полисть	г.Старая Русса	3510	21	1877
Собственный бассейн оз. Ильмень					
55	Тулесля	г.Старая Русса	52	17	1958
56	Перехода	д.Подсосонье	95.1	50	1945
57	Псижа	д.Подолож	296	10	1962-1987
Бассейн р.Шелони					
58	Шелонь	г.Порхов	2950	128	1934
59	Шелонь	д.Заполье	6820	59	1923
60	Северка	д.Большая Зуев- ка	322	5.4	1944-1984
61	Судома	д.Порожек №2	457	5.7	1944-1998
62	Полонка	д.Новые Буриги	433	14	1948-1991
63	Уза	д.Дубская	515	28	1948
64	Ситня	д.Пески	906	13	1950
65	Мшага	д.Раглицы	1250	17	1955

В метеорологическом отношении бассейн изучен достаточно хорошо. В таблице 1.2 представлены сведения об основных метеорологических станциях.

Таблица 1.2 – Сведения о метеостанциях

№ на рис. 1.1	Код станции	Метеостанция	№ на рис. 1.1	Код станции	Метеостанция
1	26298	Бологое	10	26258	Псков
2	26291	Боровичи	11	26275	Старая Русса
3	–	Валдай	12	26264	Струги Красные
4	26477	Великие Луки	13	–	Сушево
5	26384	Демянск	14	26378	Холм
6	26268	Дно	15	26479	Торопец
7	26285	Крестцы	16	–	Марево
8	26179	Новгород	17	26188	Веребье
9	26283	Окуловка	18	–	Войцы

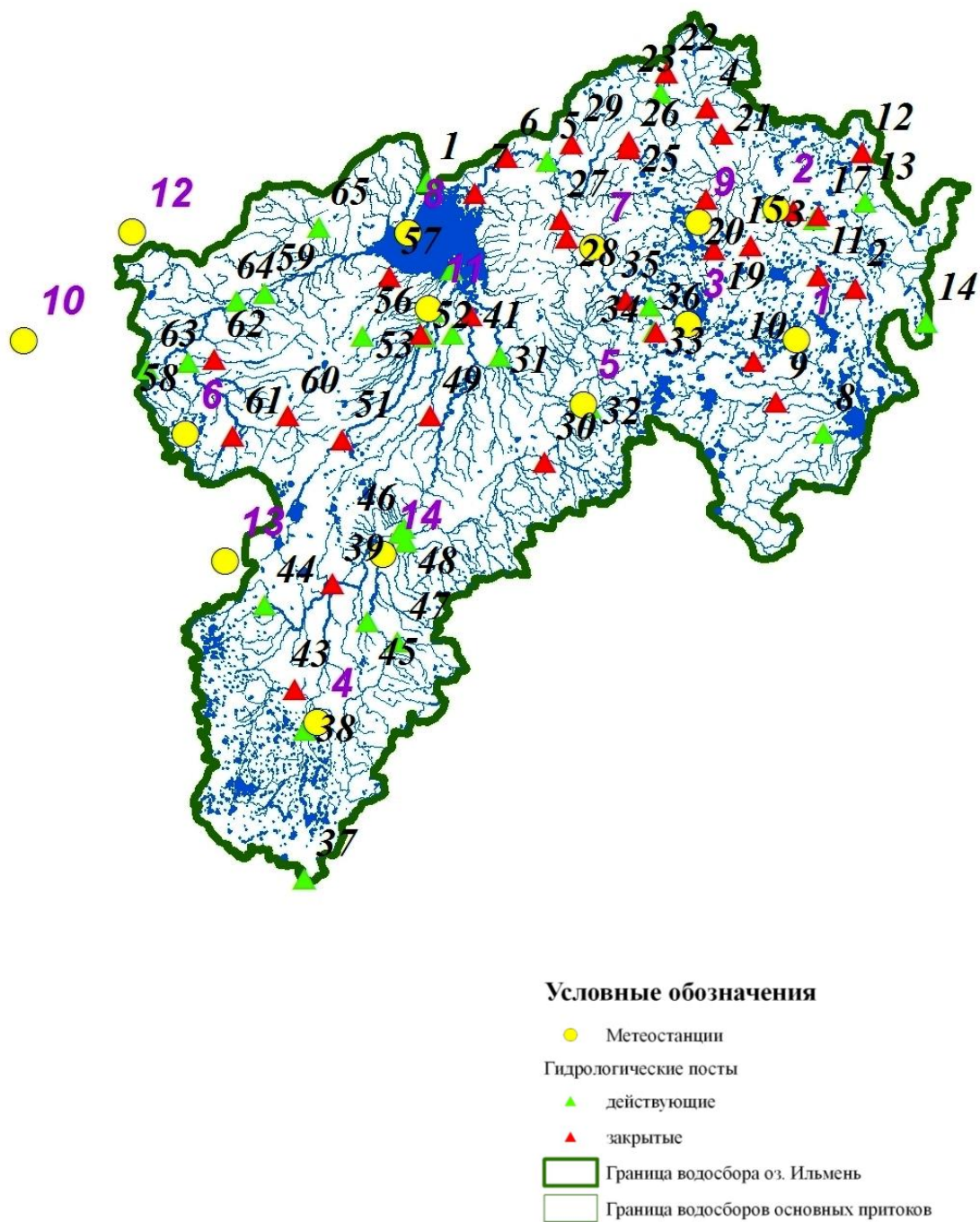


Рисунок 1.1 – Схема расположения действующих и закрытых постов, метеостанций

2 Долгосрочные прогнозы стока рек и притока воды в водохранилища в период межени

2.1 Источники питания и составляющие меженного стока

Источниками питания равнинных рек в меженный период являются жидкие осадки и подземные воды. Роль осадков зависит от климатических условий. В рассматриваемом районе, относящемся к зоне избыточного увлажнения, дождевые паводки на реках в период межени – частое явление. В период зимней межени большинство рек питается исключительно за счет подземных вод и в некоторых районах с мягким климатом они получают дополнительное питание за счет таяния снега во время оттепелей и дождей.

Физико-географические факторы, такие как размер речного бассейна, глубина вреза русел, заболоченность и озерность, оказывают существенное влияние на режим рек в межень. Заболоченность, а также озерность оказывают регулирующее влияние на сток рек в маловодный период.

После окончания половодья в бассейне остается некоторый запас влаги. Он трудно поддается вычислению, но находится в прямой зависимости от размеров водосбора и его морфологических характеристик. Также трудно определить и сезонный запас грунтовых вод.

Искомый запас воды (м^3) можно определить по уравнению

$$W_{t_0} = 86400 \sum_{t=n}^{t=t_0} Q_i \quad (2.1)$$

Полученная в формуле (2.1) величина не является полным запасом подземных вод в бассейне, а характеризует количество влаги, участвующей в меженном стоке. Глубоководное питание можно принять равным минималь-

ному зимнему расходу. Тогда величина сезонного грунтового запаса может быть определена по формуле

$$W_{zp} = (Q_T - q)T - (W_0 - W_n), \quad (2.2)$$

где W_{zp} – объем сезонного грунтового питания за период $T = t_n - t_0$, м³

Q_T – средний расход воды в замыкающем створе за тот же период;

q – расход воды, обусловленный глубоководным подземным питанием;

W_0 и W_n – объемы воды в русловой сети соответственно на начало и конец расчетного периода.

Количество воды, находящейся в русловой сети бассейна на заданный момент времени, характеризует в определенной мере средний ее расход в замыкающем створе за период, равный времени стекания этой воды. Данную закономерность используют в прогнозах стока больших рек, в том числе и в период межени. В последнем случае благодаря замедленному истощению подземного питания данные о русловых запасах могут быть использованы для прогнозов средних расходов воды с заблаговременностью, превышающей максимальное время добегания, а также период осреднения расходов [3].

2.2 Уравнение истощения и определение его параметров

При истощении запаса грунтовых вод происходит спад расходов воды во времени. Такой спад было предложено описывать двухпараметрическим экспоненциальным уравнением следующего вида

$$Q(t) = (Q_0 - q) \exp(-\alpha t) + q, \quad (2.3)$$

где Q_0 и q – соответственно начальный расход в реке и минимальный расход, обусловленный глубоководным питанием (базисный сток), м³/сек;

t – время в сутках, отсчитываемое от того момента времени t_0 , на который берется начальный расход воды;

α – константа, характеризующая интенсивность истощения сезонного запаса подземных вод;

e – основание натуральных логарифмов.

Уравнение (2.3) предполагает, что между средними расходами воды, вычисленными за смежные периоды времени одинаковой длительности, должна существовать линейная зависимость вида

$$Q_{n+1} = \alpha Q_n + (1 - \alpha)q, \quad (2.4)$$

где Q_n и Q_{n+1} – средние расходы соответственно за предшествующий и последующий -периоды T (декада, месяц);

α – угловой коэффициент, равный

$$\alpha = \exp(-\alpha t). \quad (2.5)$$

Из уравнения (2.3) также следует, что средний расход за любой период времени T является линейной функцией начального расхода

$$Q_T = kQ_0 + (1 - k)q. \quad (2.6)$$

В этом уравнении

$$k = [(1 - \exp(\alpha T))/(\alpha T)], \quad (2.7)$$

где T – период, за который вычисляется средний расход

2.3 Виды и методика долгосрочных прогнозов стока и уровней воды в период межени

Основными видами долгосрочных прогнозов уровней воды и стока в периоды летне-осенней и зимней межени являются:

- прогнозы сезонного (за весь период межени) стока;
- прогнозы средних и минимальных месячных уровней воды на судоходных реках;
- прогнозы квартального и месячного притока воды в водохранилища.

В основе всех методов, используемых для прогнозов, лежат закономерности формирования стока. Возможность долгосрочного прогноза меженного стока появляется благодаря закономерности истощения запасов воды в речном бассейне.

Кроме того возможность прогнозов зависит также от наличия и качества данных метеорологических и гидрометрических наблюдений.

Обычно при разработке методики прогноза используют два подхода: корреляционный и подход, основанный на использовании уравнения истощения.

Зная начальный расход и линейные зависимости, вытекающие из уравнения истощения (2.3) можно прогнозировать такие характеристики меженного стока, как суммарный сток за межень, квартальный и среднемесячный сток. Методы, основанные на уравнении истощения, дают хорошие результаты, когда роль дождевого питания невелика.

Когда дождевое питание играет значительную роль. Возможность прогноза определяется размером бассейна и изменчивости осадков. При большой изменчивости последних от года к году и значительной их роли в формировании меженного стока прогнозы средних квартальных и месячных расходов воды без учета будущих осадков весьма ограничены. В этом случае основными методами при разработке методики прогноза становятся регрессионный и дискриминантный анализ.

2.4 Прогнозы сезонного меженного стока и его распределение во времени

Прогноз сезонного меженного стока обычно дается на основе линейных зависимостей, вытекающих из уравнения истощения (2.3). Параметры зависимостей получают по эмпирическим данным. Разработка методики данных прогнозов включает в себя следующие основные этапы [3].

1. Сбор, обработка и анализ исходных гидрометеорологических данных.

2. Построение обобщенной эмпирической линейной зависимости средних месячных или средних декадных расходов воды за весь период межени типа

$$Q_{n+1} = aQ_n + b \quad (2.8)$$

и определения ее параметров a и b

3. Определение параметров уравнения истощения стока a и q и параметров расчетных линейных уравнений.

4. Определение статистических характеристик дополнительного стока за период заблаговременности прогноза, вызываемого снеготаянием и осадками, для каждого месяца, квартала и всего периода межени. Эта методика лучше всего подходит к условиям, когда дождевая или тало-дождевая составляющие меженного стока малы и не оказывают слишком большого искажающего влияния на естественный ход истощения бассейнового запаса воды.

Когда роль дождевой составляющей велика производится модификация методики. При большой изменчивости осадков от года к году вероятность успешных прогнозов не велика. Суть модификации состоит в следующем: выполнив предварительно срезку колебаний стока, связанных с метеорологическими условиями, эмпирическим путем определяют уравнения истощения

и линейные расчетные уравнения, которые позволяют рассчитывать гарантированные в определенной мере расходы воды за сезон и каждый календарный месяц, а дополнительный сток учитывать чисто статистически, т. е. в виде средних (нормальных) «добавок» как в целом за сезон, так и за соответствующие его календарные месяцы и кварталы. Такого рода добавки вычисляют как средние многолетние величины за достаточно длительный период наблюдений.

5. Заключительный этап, заключающийся в оценке эффективности разработанных методик [3].

Методика дает хорошие результаты при ее использовании для прогнозов в летний и зимний периоды на равнинных реках. В осенний период, когда велика изменчивость осадков от года к году, методика может вообще не дать положительного результата. Такие ситуации возникают с прогнозами меженного стока в западной части, степной, лесостепной и лесной зон на европейской части России в зимний период, что связано с большой изменчивостью осадков в осенний период, частыми зимними оттепелями и большой амплитудой в сроках наступления отрицательной температуры зимой и положительной температуры весной. Еще одну трудность в прогнозы меженного стока вносит процесс установления ледостава на реках, особенно тех, замерзание которых происходит по течению сверху вниз. Искажение закономерного спада расходов в этот период наиболее заметно на больших реках. Проявляется оно в довольно резком временном снижении расходов воды перед установлением ледостава и последующем их увеличении после ледостава до некоторого предела, после которого начинается закономерное истощение стока. Методика может быть использована и для прогноза стока по декадам [3].

2.5 Прогнозы месячного стока по данным о предшествующих расходах воды

Наиболее простым способом прогноза расходов воды является способ, который по сути является упрощенной реализацией вышеописанного метода.

При построении зависимостей для прогнозов месячного стока средний расход предшествующего месяца (Q_n) нередко заменяют средним расходом за несколько дней или даже расходом на 25-е число. Опыт построения связей типа $Q_{n+1} = f(Q_n)$ говорит о том, что для рек с малым дождевым стоком в период межени такие связи обычно линейны. При относительно большой дождевой составляющей стока и большой ее изменчивости от года к году и от месяца к месяцу решающую роль в прогнозах как месячного, так и квартального стока приобретает прогноз атмосферных осадков. В настоящее время выпускаемые прогнозы месячной аномалии осадков пока не удовлетворяют потребности решения гидрологических задач. Прогнозы календарного квартального стока, также как и месячного, могут в определенных условиях основываться на использовании эмпирически установленных зависимостей вида $Q_{KB} = f(Q_0)$, где Q_{KB} – средний расход воды за интересующий квартал; Q_0 – начальный для данного квартала расход воды.

В качестве начального расхода при отыскании такого вида зависимостей принимают средний расход воды за последние 5 – 10 дней предшествующего месяца. Длительность периода осреднения при определении начального расхода воды Q_0 зависит от степени изменчивости (короткопериодных колебаний) расходов в меженный период. Чем меньше и реже эти колебания, тем короче может быть период осреднения [3].

2.6 Прогнозы стока по данным о запасе воды в русловой сети и осадкам

Связи типа $Q_{n+1} = f(Q_n)$ подчас бывают не достаточно тесные. Это характерно для бассейнов крупных рек с большим временем добегания и существенной долей дождевой составляющей. Прежде всего, это вызвано неравномерностью осадков во времени и по площади.

В этом случае используют информацию о запасе воды в русловой сети. Для построения расчетных графиков запас воды в руслах речной сети можно выражать в м^3 или в размерностях расходы воды. Обычно такие зависимости линейны. В общем виде такие зависимости выражают двухчленным уравнением

$$Q_{t-t_0} = \alpha V_{t_0} + V_{\text{мин}}, \quad (2.9)$$

где Q_{t-t_0} – средний расход за месяц или квартал, $\text{м}^3/\text{сек}$;

V_{t_0} – запас воды в руслах речной системы на момент времени t_0 , т. е.

на дату выпуска прогноза.

Зависимости, получаемые для квартального стока, как правило, менее тесные. Более тесные зависимости получаются для районов недостаточного увлажнения, менее тесные – для районов избыточного увлажнения. Существуют два пути для учета дождевой составляющей в прогнозах месячного и квартального стока. Первый из них состоит в расчете некоторого минимального (гарантированного) месячного или квартального стока ($Q_{\text{гар}}$) и приближенном определении дождевой или тало-дождевой составляющей. Ожидаемый средний расход воды в этом случае определяется как сумма

$$Q_{t-t_0} = Q_{\text{гар}} + Q_{\text{Д}'}, \quad (2.10)$$

где $Q_{д'}$ – ожидаемая (вычисленная) дождевая или тало-дождевая составляющая стока, м³/сек.

Второй возможный путь состоит в отыскании корреляционной зависимости между месячным или квартальным стоком, начальным запасом воды в руслах речной сети и непосредственно количеством осадков, определяющих дождевую составляющую стока, т. е. $Q_{t-t_0} = f(V_{t_0}, x)$.

Преимущество второго метода над первым состоит в том, что для реализации первого метода необходим большой объем исходной гидрометеорологической информации, в том числе прогноз величины атмосферных осадков. По этой причине реальная возможность для прогнозов состоит в предвычислении гарантированной составляющей месячного или квартального стока, пользуясь уравнением истощения (2.3), а дождевую составляющую стока принимать равной среднему многолетнему значению $N_{Q_{д}}$

$$Q_{t-t_0} = Q_{зап} + N_{Q_{д}} \quad (2.11)$$

При небольшой изменчивости дождевой или тало-дождевой составляющей месячного и квартального стока от года к году прогнозы по зависимости (2.11) могут давать удовлетворительные результаты.

Далеко не просто выделить вполне точно стокообразующий период при разработке методики прогнозов стока за календарный месяц. Поэтому важно установить его хотя бы в первом приближении. Практически рекомендуют руководствоваться следующим правилом в отношении равнинных рек: будущие осадки берут за весь последующий месяц для не очень больших рек с максимальным временем пробега воды в бассейне до 15 суток. Бассейн разбивают в соответствии со временем пробега воды на три части – для крупных рек с продолжительностью добегания воды, равной 30 суток и более. Для наиболее удаленной от замыкающего створа части бассейна осадки берут за предшествующий месяц; для средней – за две последние декады пред-

шествующего месяца, для нижней части бассейна – за последнюю декаду предшествующего месяца и за две первые декады последующего месяца.

Вычисление слоя осадков за стокообразующий период производят при этом по следующей формуле:

$$x = \varphi_1 x_1 + \varphi_2 x_2 + \varphi_3 x_3, \quad (2.12)$$

где $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – доли площадей бассейна в порядке увеличения времени пробега воды до замыкающего створа;

x_1, x_2, x_3 – средние значения суммарного слоя осадков для соответствующих площадей за указанные выше периоды времени.

Величина стокообразующих осадков, вычисленная таким образом используется в качестве второй переменной для установления эмпирической зависимости $Q_{t-t_0} = f(V_{t_0} + x)$. Для прогнозов квартального стока надо учитывать, что большие осадки, выпавшие в начале или середине квартала, играют не одинаковую роль в формировании стока с такими же по величине осадками, выпавшими в самом конце квартала. Во всех случаях данные об осадках должны использоваться по возможно большему числу станций [3].

2.7 Прогнозы средних и минимальных месячных уровней воды

Уровни воды в реках непосредственно связаны с расходами, поэтому методика прогнозов средних месячных уровней основывается на тех же принципах, что и методика прогнозов среднемесячных расходов. В конечном счете задачу сводят к отысканию эмпирических зависимостей вида

$$H_n = f(Q_{n-1}), H_n = f(Q_{n-1}, x) \text{ или } H_n = f(V_{t_0}, x), \quad (2.13)$$

где H_n – средний уровень в интересующий месяц;

Q_{n-1} – средний расход за предшествующий месяц или за последнюю его декаду;

x – осадки за стокообразующий период;

V_{t_0} – начальный запас воды в русловой сети, например на 25-е число предшествующего месяца.

Связи уровней с расходами воды носят криволинейный характер, в отличие от связей между расходами. Возможно использование зависимости среднего (или минимального) месячного уровня от уровня воды на заданную дату предшествующего месяца. Решение задачи прогнозов средних и минимальных уровней воды, значительно сложнее, в зонах избыточного увлажнения. Необходимо пользоваться теми же рекомендациями, что и в отношении построения зависимостей для прогнозов средних месячных расходов, при отыскании эмпирических зависимостей вида (2.12). Возможно также построение зависимостей между минимальными уровнями предшествующего и последующего месяцев с учетом осадков за эти месяцы. В случае, когда интересующие наблюдательные посты не являются гидрометрическими, т. е. на них измеряются только уровни и не измеряются расходы воды, приходится прибегать к построению зависимостей между уровнями воды [3].

3 Динамические модели формирования стока и их использование в прогнозах

Описанные в предыдущей главе методы прогнозов, базирующиеся на достаточно простых аналитических зависимостях, не всегда дают удовлетворительные результаты. В настоящее время все большее значение приобретают методы прогноза, основанные на математическом моделировании. При этом, в последние годы осуществляется переход в описания отдельных процессов стокообразования к созданию системных моделей, которые описывают весь цикл формирования стока от поступления воды на водосбор до добегания воды к замыкающему створу [4]. Расчеты и прогнозы с использованием моделей позволяют достаточно быстро осуществить проверку модели путем сопоставления расчетных и натурных данных.

Модели позволяют решать как диагностические, так и прогностические задачи. Их преимуществом является относительная простота и невысокая требовательность к исходной информации [4].

3.1 Общее представление о системном моделировании

В целом системную гидрологическую модель можно представить в виде схемы, представленной на рисунке 3.1. Основным внешним воздействием, оказывающим влияния на водосбор, являются метеорологические факторы (температурой воздуха, скоростью ветра и т. д.), среди которых главное место занимают атмосферные осадки. Выпавшие осадки формируют склоновый сток, который затем поступает в русловую сеть, трансформируется в русловой. Часть выпавших осадков испаряется, часть инфильтруется в почву, подпитывая ненасыщенную зону. Взаимодействие насыщенной и ненасыщенной зон, положение напорного горизонта и русловой сток определяют уровень грунтовых вод [5].

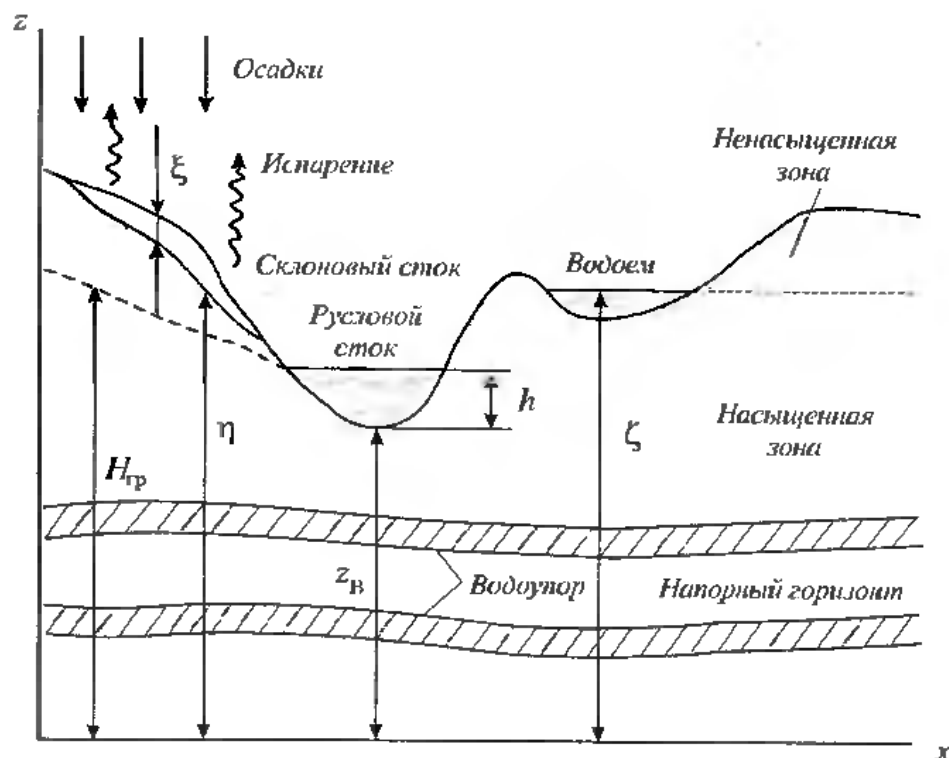


Рисунок 3.1 – Основные звенья гидрологического цикла

В большинстве гидрологических задач важную роль играет наличие гидравлической связи между поверхностными и подземными водами. В этих случаях необходимо определять уровни и расходы воды по совместной математической модели. Для замыкания такой системы уравнений использована экологическая модель роста растений, определяющая отток воды из ненасыщенной зоны почвы через корневую систему растений и транспирацию в приземный слой атмосферы.

В общем виде систему уравнений гидрологического цикла можно записать в виде одного векторного уравнения

$$F_1(Y, \varepsilon, \Lambda, x, t) = 0 \quad (3.1)$$

где Y – вектор реакции системы;

ε – вектор внешних воздействий;

Λ – вектор задаваемых параметров.

Выходом модели, то есть реакцией системы, являются те гидрологические характеристики, которые нам необходимы. Это может быть слой стока, расходы воды реки или уровень воды в водоеме. Эти характеристики являются компонентами вектора Y и характеризуют состояние системы.

Кроме того в любой модели присутствуют независимые переменные: геометрические координаты x, y, z и время t ; т. е. считается, что в общем случае и внешние воздействия, и реакция системы меняются в каждой точке речного бассейна и в каждый момент времени.

Еще одним важным элементом модели является вектор параметров системы Λ . Параметры позволяют учесть специфику каждого отдельного объекта при моделировании.

Обычно модель (3.1) – дифференциальное уравнение, поэтому его можно записать так:

$$\partial Y / \partial t + L(\Lambda, Y) = \varepsilon \quad (3.2)$$

где L – оператор, определяемый конкретным набором используемых моделей отдельных звеньев гидрологического цикла. Интегрируя (3.2) по времени, получаем

$$Y(t) = Y(t_0) - \int_{t_0}^t L(\Lambda, Y) dt + \int_{t_0}^t \varepsilon dt \quad (3.3)$$

Работа любой модели возможна при задании начального состояния системы $Y(t_0)$. Обычно начальное состояние системы определяется путем непосредственных измерений на наблюдательной сети.

Модели позволяют решать как расчетные задачи, так и прогностические. Прогноз по моделям осуществим, если имеется прогноз (или «сценарная оценка») внешних воздействий.

В дифференциальной форме связь между вектором внешних воздействий и реакцией системы можно записать в виде:

$$dY(x,t) = d\varepsilon(x,t). \quad (3.4)$$

С учетом выражения для дифференциала $d = \frac{\partial}{\partial t}dt + \frac{d}{dx}dx$ последнее выражение после деления на dt можно записать так:

$$\partial Y / \partial t + u(x,t)\partial Y / \partial x = \dot{\varepsilon}(x,t), \quad (3.5)$$

где $u(x,t) = dx/dt$ – скорость;

$\dot{\varepsilon}(x,t) = d\varepsilon/dt$ – интенсивность внешних воздействий.

Для моделей несжимаемых жидкостей $\operatorname{div} u = 0$. Таким образом (3.5) можно записать в виде закона сохранения субстанции:

$$\partial Y / \partial t + \operatorname{div}(uY) = \dot{\varepsilon}(x,t). \quad (3.6)$$

Для замыкания модели (3.6) необходимо выразить поток вектора состояния системы через искомый вектор состояния Y :

$$U \cdot y = f(Y, \Lambda, x, t). \quad (3.7)$$

Связь (3.7) задают, как правило, в виде алгебраического или дифференциального уравнения на основе закономерностей, действующих в системе [5].

Система уравнений (3.6) – (3.7) дает возможность получить модель для различных видов гидрологических процессов.

3.2 Модель замкнутого водоема

При изучении внутренних процессов, происходящих в водоемах, используют довольно сложные уравнения. Однако для решения задачи изучения уровня режима водоема можно ограничиться довольно грубой моделью, которая учитывает только изменение уровня во времени.

В качестве внешнего воздействия на водоем выступают: поверхностный приток и отток воды из водоема, приток и отток грунтовых воды, атмосферные осадки, выпавшие на зеркало водоема, испарение и еще ряд факторов (например, антропогенное воздействие в виде забора или сброса воды).

В общем случае уровень воды меняется как во времени, так и по площади водоема. Если же пренебречь деформацией уровня озера и рассматривать его просто как аккумулирующую емкость, то уравнение (3.6) можно осреднить по площади водоема

$$\frac{1}{F} \int_F \frac{\partial H}{\partial t} dF + \frac{1}{F} \int_F \operatorname{div} (uH) dF = \frac{1}{F} \int_F \dot{\varepsilon} dF. \quad (3.8)$$

В этом случае мы получим следующее уравнение:

$$\partial H / \partial t + k_M H = \dot{\varepsilon}. \quad (3.9)$$

Под H и $\dot{\varepsilon}$ имеются в виду средние по площади значения уровня воды в водоема и внешнего воздействия; k_M – морфометрический коэффициент, характеризующий чашу водоема. Для решения задачи надо знать начальный уровень $H = H_0$ при $t = 0$.

3.3 Модель склонового стока

Как указывалось в п. 3.2 в модели водоема одним из внешних воздействий является расходы воды впадающих в водоем притоков. Прогноз расходов воды в замыкающих створах притоков может быть осуществлен с помощью модели склонового стока.

Модель склонового стока с распределенными параметрами имеет следующий вид[5]:

$$\partial \xi / \partial t + \partial q_x / \partial x + \partial q_y / \partial y = \dot{\varepsilon}(x, y, t), \quad (3.10)$$

$$q_x = f_1(\xi), \quad q_y = f_2(\xi), \quad (3.11)$$

где ξ — слой поверхностного стока;

q_x, q_y — расход воды в направлении оси x и y ;

$\dot{\varepsilon}(x, y, t)$ — внешнее воздействие.

Для решения задачи расчета (прогноза) стока в замыкающем створе часто упрощают модель (3.10) – (3.11) можно упростить путем пространственного и временного осреднения. Сначала выполним осреднение модели по ширине бассейна $b(x)$, т. е. по координате y :

$$\int_{b(x)} \frac{\partial \xi}{\partial t} dy + \int_{b(x)} \frac{\partial q_x}{\partial x} dy + \int_{b(x)} \frac{\partial q_y}{\partial y} dy = \int_{b(x)} \dot{\varepsilon}(x, y, t) dy. \quad (3.12)$$

При осреднении третий член в левой части обратится в нуль, и мы получим

$$\partial F_{\text{эф}}(x, t) / \partial t + \partial Q(x, t) / \partial x = \dot{\varepsilon}(x, t), \quad (3.13)$$

где $F_{\text{эф}} = \int_{b(x)} \xi dy$ – эффективная площадь сечения склона.

Чтобы иметь замкнутую систему уравнений, надо еще задать функцию $Q = f(F_{\text{эф}})$. Решением подобной модели будет зависимость $Q = f(x, t)$. Однако на практике часто не нужно, да и невозможно из-за сложности задания функции $Q = f(F_{\text{эф}})$ знать распределение суммарного расхода воды по длине бассейна, а достаточно информации о его динамике лишь в замыкающем створе. Поэтому выполним еще одно осреднение по продольной координате:

$$\int_{x_{\text{в}}}^{x_{\text{н}}} \frac{\partial F_{\text{эф}}}{\partial t} dx + \int_{x_{\text{в}}}^{x_{\text{н}}} \frac{\partial Q}{\partial x} dx = \int_{x_{\text{в}}}^{x_{\text{н}}} \dot{\epsilon}(x, t) dx \quad (3.14)$$

или

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{x_{\text{в}}}^{x_{\text{н}}} F_{\text{эф}}(x, t) dx + Q(x_{\text{н}}) - Q(x_{\text{в}}) = \dot{X} - \dot{E} - \dot{I}, \quad (3.15)$$

$$dW / dt + Q = \dot{X} - \dot{E} - \dot{I}, \quad (3.16)$$

где W – объем стока;

$Q = Q(x_{\text{н}})$ – расход воды в замыкающем створе;

$\dot{X} - \dot{E} - \dot{I}$ – интенсивность поступления воды в бассейн; $Q(x_{\text{в}}) = 0$.

Если допустить, что $W = f(k\tau)Q$, а $\dot{X} - \dot{E} - \dot{I} = k\dot{X}$, где τ – эффективное время добегания; а k – коэффициент стока, то при $f(k\tau) \sim k\tau \sim \text{const}$ (весь бассейн «стянут в точку» – замыкающий створ) получим следующую модель формирования стока с сосредоточенными параметрами:

$$\tau dQ / dt + Q / k = \dot{X}. \quad (3.17)$$

4 Поверочные прогнозы расходов воды в летне-осенний период на притоках озера Ильмень

4.1. Исходные данные

Поскольку колебания уровня озера Ильмень в первую очередь определяются поступлением воды с основных притоков и атмосферными осадками, то на первом этапе рассматривалась возможность прогнозирования расходов воды на основных притоках.

Основными притоками озера Ильмень являются реки Мста, Шелонь, Ловать, Пола и Полисть. На всех пяти указанных реках была собрана информация о среднемесячных расходах воды на створах, расположенных как можно ближе к устью. Информация о расходах бралась из изданий Государственного водного кадастра (гидрологических ежегодников) за период с 1988 по 2010 год включительно [6]. Расходы по всем рассматриваемым водотокам за летне-осенний период (май – октябрь) представлены в Приложении А.

Как следует из методики прогноза с использованием динамических моделей внешним воздействием в модели являются атмосферные осадки. Всего на водосборной площади и близи нее располагается 18 метеостанций. Однако не на всех станциях проводится полный комплекс измерений или данные наблюдений не представлены в открытом доступе. Потому в работе использовались данные по девяти метеостанциям.

Данные по атмосферным осадкам взяты с сервера ВНИИГМИ-МЦД [7]. Данные представлены в массиве в виде месячных сумм осадков, с устранением систематических погрешностей осадкомерных приборов. Расположение станций представлено на рисунке 4.1.

Для выявления стокоформирующих осадков первоначально проводился корреляционный анализ между стоком и осадками по всем метеостанциям. При этом сток за текущий месяц коррелировался как с осадками за предыду-

щий месяц, так и за текущий. Кроме того использовалась множественная корреляция с осадками за два месяца. Результаты корреляционного анализа приведены в Приложении Б.

Анализ полученных результатов показал, что выявить осадки по какой метеостанции для конкретного водосбора являются наиболее репрезентативными довольно затруднительно. Поэтому было принято решение определять осадки в центре тяжести водосбора. Для этого в геоинформационной системе ArcGIS были выделены водосборы всех рассматриваемых притоков и для них определены центры тяжести. На рисунке 4.1 представлена карта, где «звездочками» представлены центры тяжести водосборов. На следующем этапе средствами ArcGIS была проведена интерполяция для получения поля месячных сумм атмосферных осадков по всей рассматриваемой территории. На рисунках 4.2 – 4.7 в качестве примера представлены полученные поля осадков.

На следующем этапе, имея поле изолиний и используя возможности ArcGIS, были получены значения атмосферных осадков в центрах тяжести. Полученные суммы месячных осадков использовались в дальнейшем в качестве внешнего воздействия.

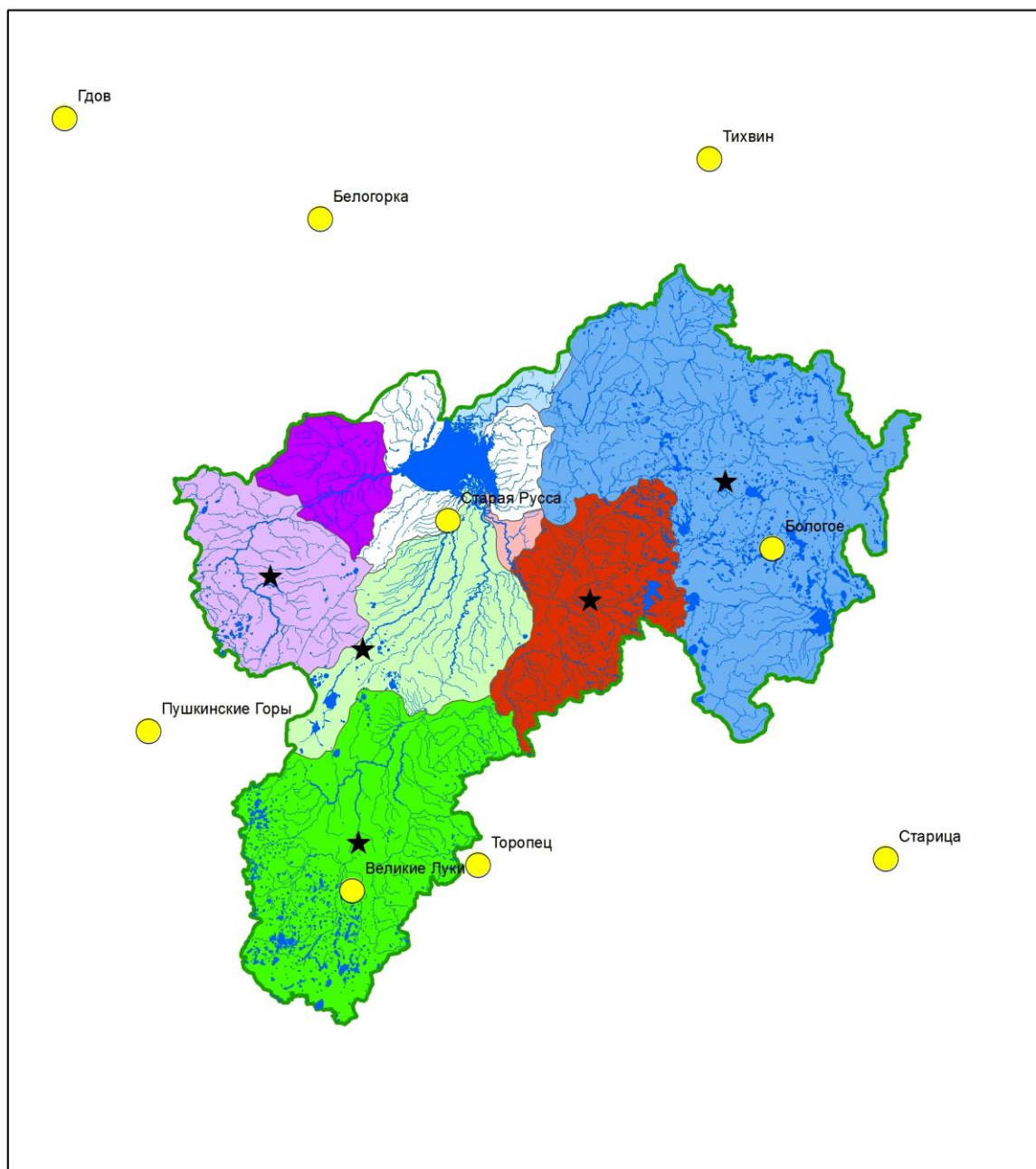


Рисунок 4.1 – Бассейны основных притоков озера Ильмень

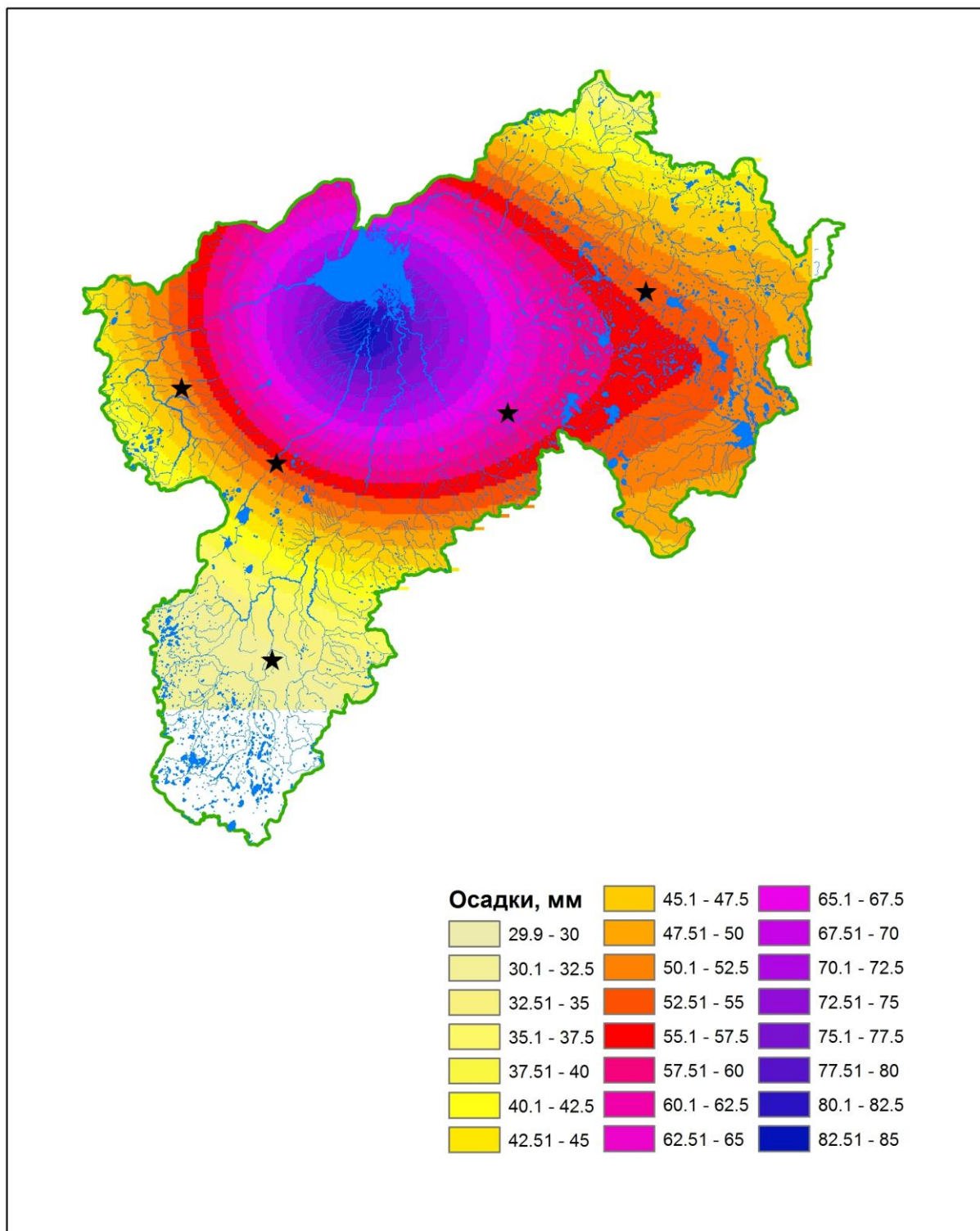


Рисунок 4.2 – Поле атмосферных осадков в мае 1988 года

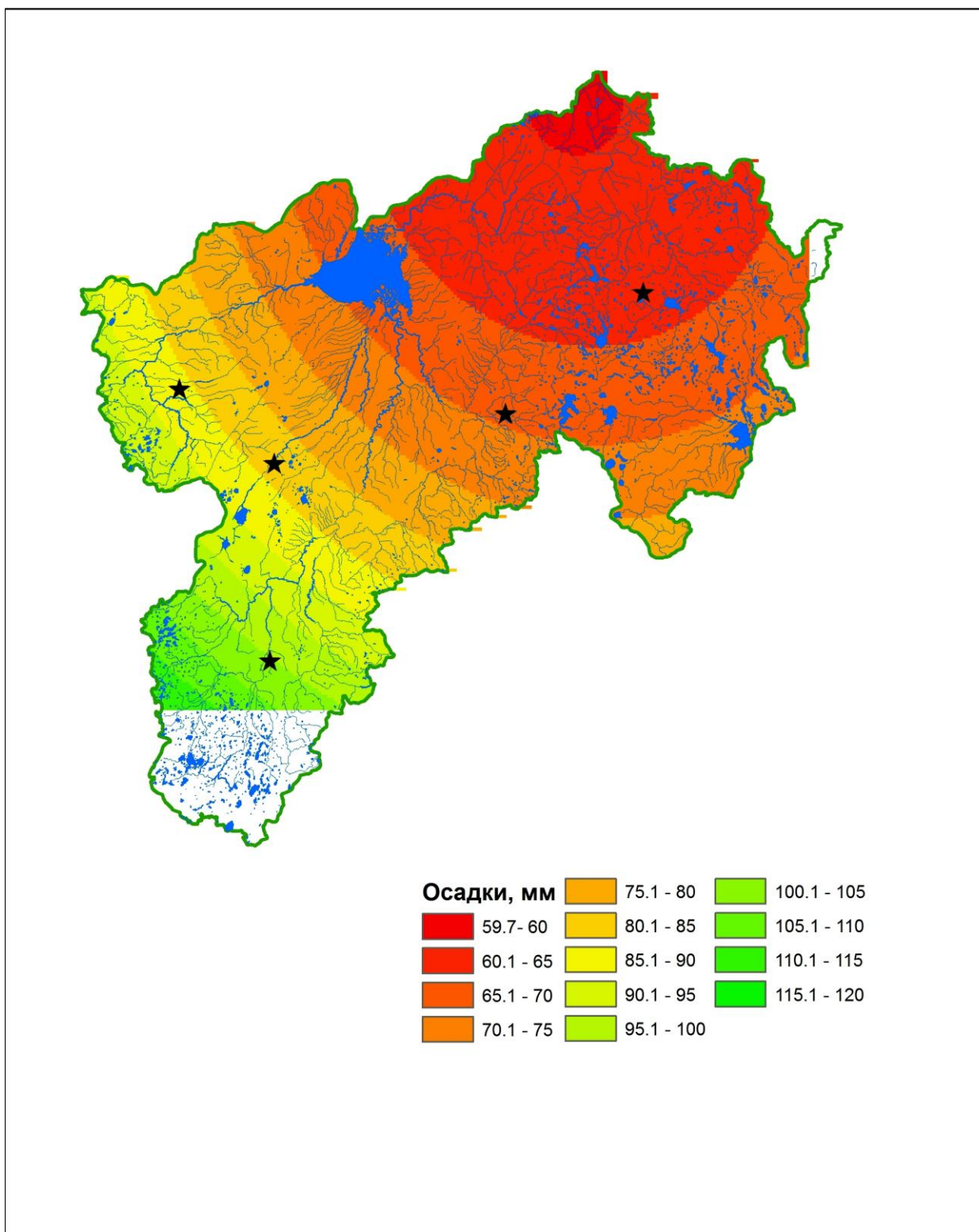


Рисунок 4.3 – Поле атмосферных осадков в июне 1988 года

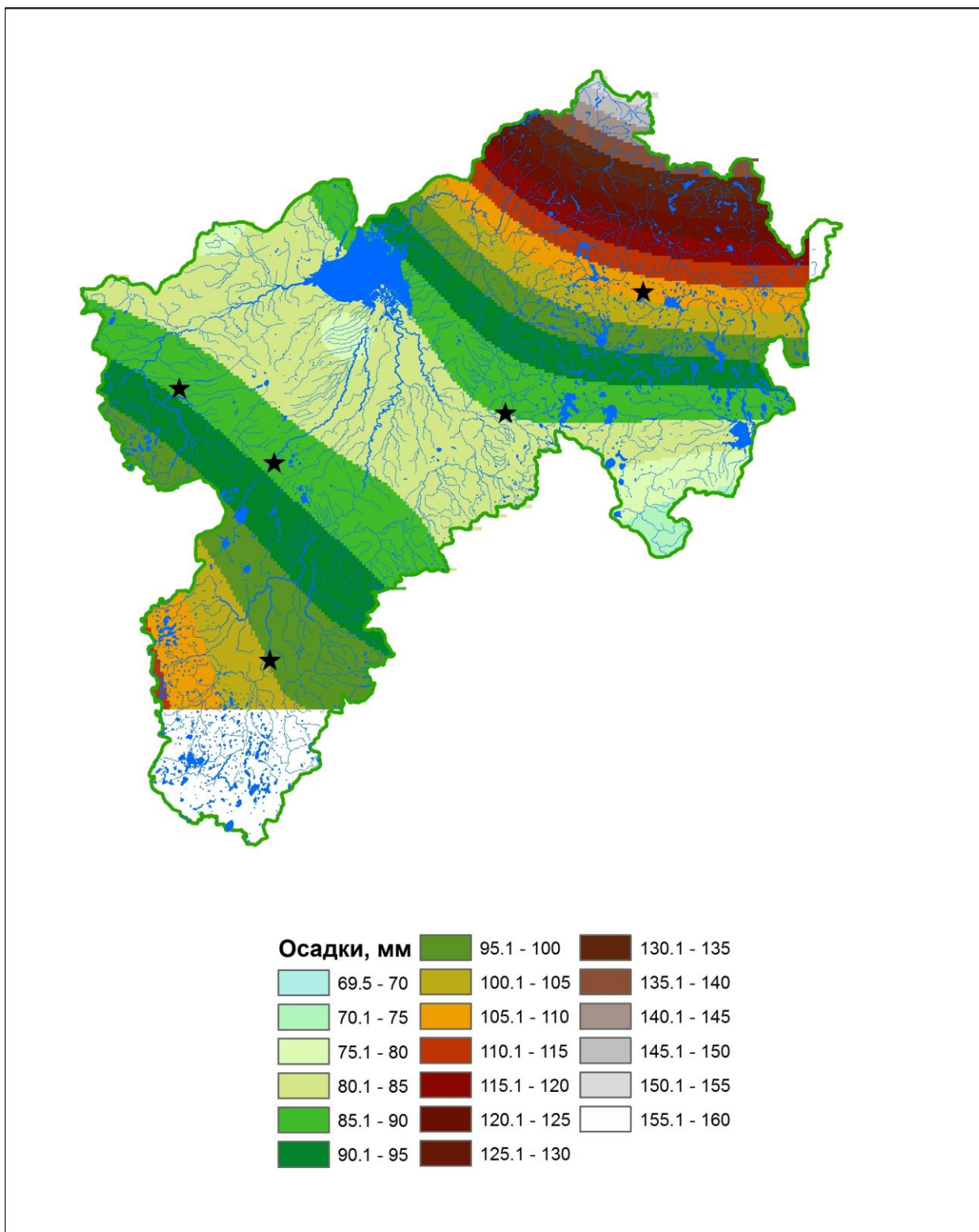


Рисунок 4.4 – Поле атмосферных осадков в июле 1988 года

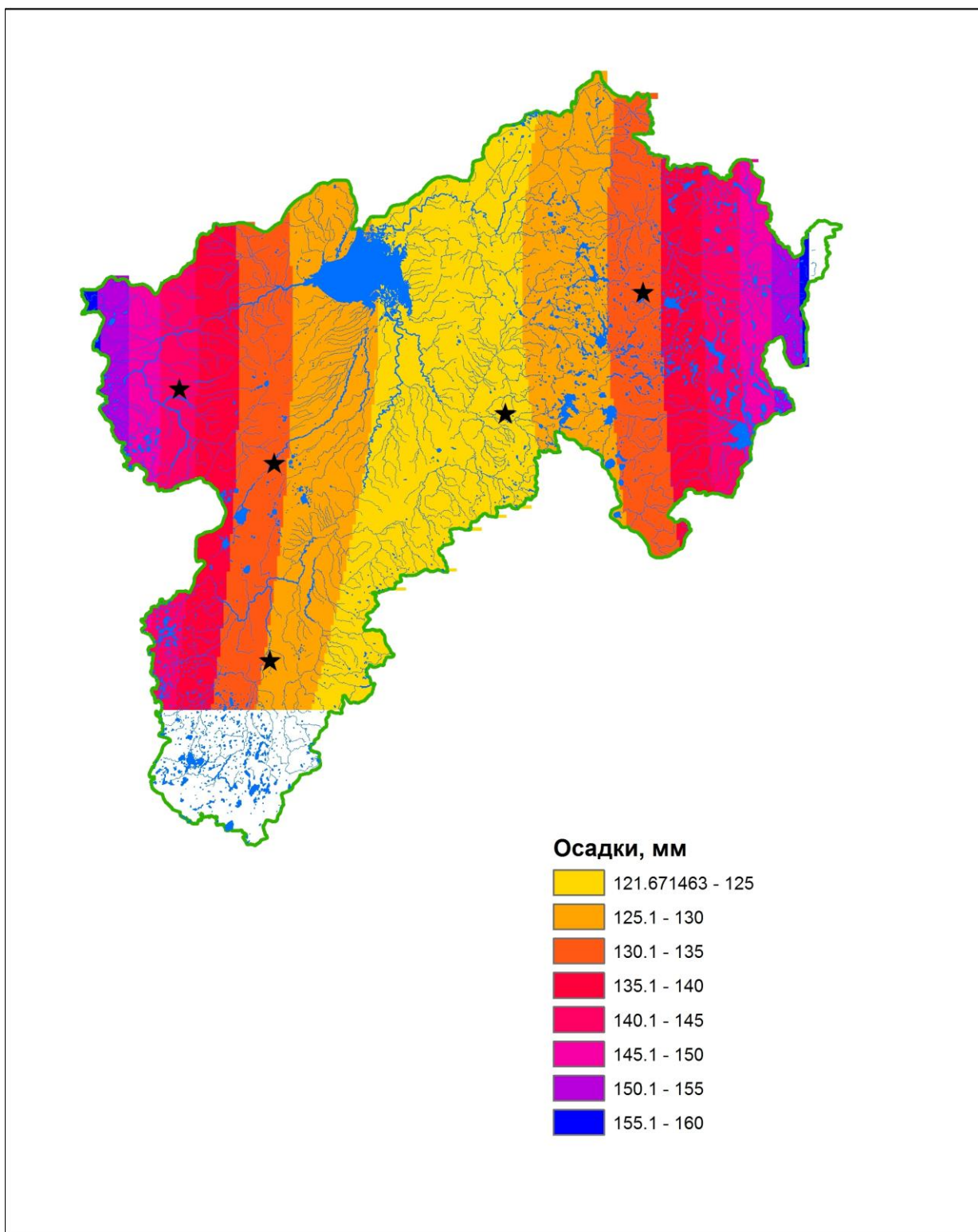


Рисунок 4.4 – Поле атмосферных осадков в августе 1988 года

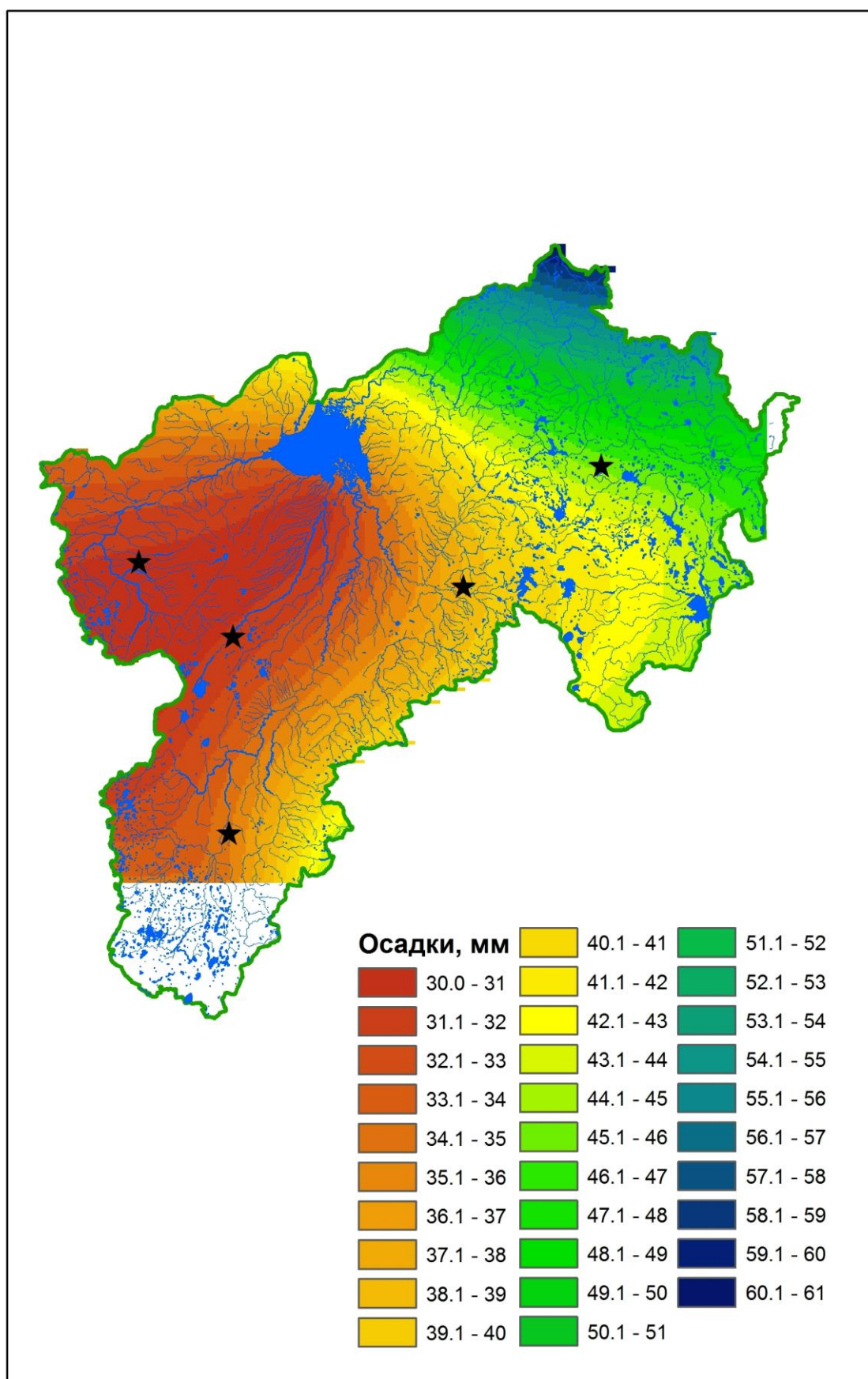


Рисунок 4.5 – Поле атмосферных осадков в ноябре 1988 года

4.2 Численное решение модели склонового стока

Решение дифференциальных уравнений возможно различными методами: аналитическим, численным, графическим. При решении прогнозных задач наибольшее распространение получили численные методы. Суть численных методов заключается в том, что производные, входящие в уравнения заменяются конечными разностями. При этом можно использовать различные шаблоны аппроксимации производных.

Поскольку используется динамическая модель в виде обыкновенного дифференциального уравнения, то для его решения в работе применялись методы Эйлера и Рунге-Кутты.

Метод Эйлера является простейшим численным методом, дающим решение первого порядка точности [8]. Если представить уравнение (3.17) в виде следующей функциональной зависимости

$$dQ/dt = f(t, Q), \quad (4.1)$$

то численная схема метода Эйлера будет выглядеть следующим образом

$$Q_{t+1} = Q_t + \Delta t \cdot f(t, Q_t). \quad (4.2)$$

Разностная схема представляет собой рекуррентные формулы, с помощью которых значение функции на шаге $t+1$ вычисляется по значению в момент времени t . Данный метод относится к одношаговым методам.

Метод Рунге-Кутты также относится к одношаговым методам. Наибольшее распространение получил метода Рунге-Кутты четвертого порядка точности.

Алгоритм метода выглядит следующим образом

$$Q_{t+1} = Q_t + \frac{\Delta t}{6}(k_0 + 2k_1 + 2k_2 + k_3), \quad (4.3)$$

$$k_0 = f(t, Q_t), \quad (4.3)$$

$$k_1 = f\left(t + \frac{\Delta t}{2}, Q_t + \frac{\Delta t \cdot k_0}{2}\right), \quad (4.3)$$

$$k_2 = f\left(t + \frac{\Delta t}{2}, Q_t + \frac{\Delta t \cdot k_1}{2}\right), \quad (4.3)$$

$$k_3 = f(t + \Delta t, Q_t + \Delta t \cdot k_2). \quad (4.3)$$

Метод требует на каждом шаге четырехкратного вычисления правой части уравнения.

4.3 Параметризация динамической модели склонового стока

Успешное функционирование модели не может быть обеспечено без наличия хорошо обработанной процедуры идентификации. Под идентификацией понимается нахождение различных величин, участвующих в образовании причинно-следственной связи входа и выхода модели.

При правильной идентификации модели расхождение между практическими и прогнозными данными должно быть минимальным. В частности, при параметризации модели, условия должны иметь такие значения, при которых заданная функция, зависящая от сходимости фактических и рассчитанных данных, достигает минимума. Такую функцию называют критерием оптимизации или критерием качества. В данной работе при проведении процедуры параметризации в качестве критерия качества было принято соотношение s/σ , принятое в гидрологических прогнозах в качестве критерия оценки эффективности методик.

Для проведения параметризации по прогнозным створам основных притоков было рассчитано среднее квадратическое отклонение изменения прогнозируемой величины за период заблаговременности прогноза σ . Величина σ рассчитывалась с учетом заблаговременности – 1 месяц. Результаты расчетов средненоголетнего значения σ представлены в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Результаты расчетов средненоголетнего значения σ

Река-Пост	σ , м ³ /с
р. Пола – д. Налючи	42
р. Ловать – д. Холм	100
р. Шелонь – д. Заполье	39
р. Полисть – д. Утушкино	7
р. Мста – д. Девкино	108

Суть параметризации заключается в решении обратной задачи, которую заключается в следующем. Зная внешнее воздействие (осадки) и задаваясь значениями параметров, рассчитывается расход воды, который затем сравнивается с фактическим. Оптимальными считаются те значения параметров, при которых значение критерия оптимизации минимально. В связи с тем, что при прогнозе использовалась модель первого порядка подбирались оптимальные значения двух параметров: коэффициента стока и времени добегания поверхностного стока. Решение дифференциального уравнения осуществлялось с помощью численных методов. При этом использовались методы Эйлера и метод Рунге-Кутты.

Прогнозы осуществлялись по четырем вариантам:

- 1) использовалась численная схема метода Эйлера, внешне воздействие (осадки) задавалось за предшествующий месяц;
- 2) использовалась численная схема метода Эйлера, задавалось прогнозное внешне воздействие (осадки) за текущий месяц;

3) использовалась численная схема метода Рунге-Кутта, внешне воздействие (осадки) задавалось за предшествующий месяц;

4) использовалась численная схема метода Рунге-Кутта, задавалось прогнозное внешне воздействие (осадки) за текущий месяц.

В приложении В представлены результаты параметризации по методам Эйлера и Рунге-Кутта. Полученные оптимальные значения параметров осреднялись за весь период оптимизации (1988 – 2005 гг.).

В таблице 4.2 представлены полученные оптимальные значения параметров. Результаты параметризации показывают, что наилучшие прогнозы выпускаются при втором варианте.

Таблица 4.2 – Результаты параметризации модели

Река	Метод Эйлера (осадки предыдущие)		Метод Эйлера (осадки текущие)		Метод Рунге-Кутта (осадки предыдущие)		Метод Рунге-Кутта (осадки текущие)	
	k	τ	k	τ	k	τ	k	τ
Ловать	0.13	1.97	0.21	1.72	0.12	1.64	0.20	1.47
Мста	0.15	2.47	0.19	1.86	0.15	2.11	0.17	1.59
Пола	0.19	2.99	0.28	7.18	0.15	2.62	0.21	6.95
Полисть	0.15	2.52	0.19	2.98	0.14	2.21	0.18	2.50
Шелонь	0.17	1.98	0.20	2.13	0.16	1.64	0.19	1.80

4.4 Поверочные прогнозы расходов воды

Поверочные прогнозы выполнялись по динамической модели склонового стока первого порядка, в состав которой входит 2 параметра: коэффициент стока и время добегания поверхностного стока. Прогнозы выпускались с заблаговременностью, равной 1 месяцу. Оценка качества прогноза выполня-

лась с помощью критерия s/σ . Качественный прогноз должен удовлетворять условию, принятым в гидрологических прогнозах: $s/\sigma \leq 0.7$. Прогноз расходов воды притоков осуществлялся по динамической модели первого порядка на период с 2006 года по 2010 год. Решение осуществлялось с помощью метода Эйлера. Графические результаты представлены в Приложении Г.

В таблице 4.3 приведены итоговые результаты оценки поверочных прогнозов.

Таблица 4.3 – Результаты оценки поверочных прогнозов расходов воды по отдельным бассейнам

Год	S/σ	k	τ
р.Ловать – д.Холм			
2006	1,36	0,13	1,97
2007	0,32	0,13	1,97
2008	0,38	0,13	1,97
2009	1,2	0,13	1,97
2010	0,38	0,13	1,97
р.Мста – д.Девкино			
2006	1,14	0,15	2,47
2007	0,49	0,15	2,47
2008	0,55	0,15	2,47
2009	1	0,15	2,47
2010	0,76	0,15	2,47
р.Пола – д.Налючи			
2006	1,2	0,28	7,18
2007	0,57	0,28	7,18
2008	0,65	0,28	7,18

Продолжение таблицы 4.3

Год	S/σ	k	τ
2009	1,68	0,28	7,18
2010	0,91	0,28	7,18
р.Полисть-д.Утушкино			
2006	1,4	0,19	2,98
2007	0,44	0,19	2,98
2008	0,47	0,19	2,98
2009	1,09	0,19	2,98
2010	0,54	0,19	2,98
р.Шелонь-д.Заполье			
2006	1,29	0,2	2,13
2007	0,62	0,2	2,13
2008	0,62	0,2	2,13
2009	12,49	0,2	2,13

Из графиков и таблицы 4б3 видно, что для реки Ловать в 2007, 2008, и 2010 гг. отношение s/σ удовлетворяет критерию эффективности, принятому в гидропрогнозах $s/\sigma \leq 0.7$. Минимальное значение s/σ равное 0.32 наблюдается в 2007 году.

Для реки Мста с 2007 – 2010 гг. отношение s/σ удовлетворяет критерию эффективности $s/\sigma \leq 0.7$. Минимальное значение s/σ равное 0.21 наблюдается в 2007 году.

Для реки Пола в 2007 и 2008 гг. отношение s/σ удовлетворяет критерию эффективности. Минимальное значение s/σ равное 0.57 наблюдается в 2007 году

Для реки Полисть в 2007, 2008 и 2010 гг. отношение s/σ удовлетворяет критерию эффективности. Минимальное значение s/σ равное 0.44 наблюдается в 2007 году.

Для реки Шелонь в 2007 и 2008 гг. отношение s/σ удовлетворяет критерию эффективности.

В целом используемые методики можно считать эффективными для выпуска прогнозов среднемесячных расходов воды в летне-осенний период.

5 Прогноз уровней озера Ильмень

5.1 Исходные данные

Колебания уровней происходят под влиянием множества факторов. Это и атмосферные осадки, выпадающие на зеркало озера, и приток (отток) поверхностных и подземных вод, а также величина испарения с водного зеркала. Все указанные факторы в динамической модели водоема, используемой для прогноза, выступают в качестве суммарного внешнего воздействия и требуют предварительного расчета перед началом выпуска прогноза уровней воды. Для оценки всех составляющих внешнего воздействия была собрана исходная гидрометеорологическая информация и выполнены расчеты.

Испарение

Испарение с водной поверхности крупных водоемов находится под влиянием не только общих циркуляционных и физико-географических факторов, отличающихся в зависимости от морфометрии котловины и ее размеров, но и гидрометеорологических элементов, изменяющихся по акватории водоема и являющихся определяющими в формировании испарения.

Оценка испарения с водной поверхности может быть произведена с использованием нескольких методов. Большое количество методов вызвано тем, что сложный механизм воздействия между водной поверхностью водоема и прилегающей к ней воздушной массой полностью не раскрыт. Более точным из разработанных методов считается инструментальный (прямой) метод, т.е. метод непосредственного измерения слоя испарившейся воды с помощью водных испарителей. К прямому методу относится и пульсационный метод. Однако эти методы не всегда могут быть применены, вследствие их трудоемкости и невозможности использования. Поэтому для определения испарения с поверхности воды применяют косвенные методы, основанные на использовании уравнений водного и теплового баланса, турбулентной диф-

фузии водного пара в атмосфере. Также разработаны эмпирические формулы для расчета испарения по метеорологическим данным, получившие наиболее широкое применение в гидрологической практике.

При отсутствии данных наблюдений для расчетов испарения на водоемах необходимо знать среднемесячные значения температуры, скорости ветра и абсолютной влажности воздуха, измеренные над поверхностью водоема. Таких наблюдений в большинстве случаев не имеется. Для расчета испарения используются данные о состоянии воздушной массы, которые получены на континентальных метеостанциях, но с учетом её трансформации при переходе с суши на водную поверхность.

Величина испарения с водоема E_0 (мм), расположенного на равнинной территории, определяется по формуле, разработанной А. П. Браславским и З. А. Викулиной:

$$E_0 = 0,14n(e_0 - e_{200})(1 + 0,72u_{200}), \quad (5.1)$$

где n – число суток в расчетном интервале времени, за который принимается месяц, а в начале и в конце безледоставного периода – соответствующее число суток от даты вскрытия до конца данного месяца и от начала последнего месяца безледоставного периода до даты замерзания водоема.

e_0 – среднее значение максимальной упругости водяного пара, вычисленное по температуре поверхности воды в водоеме, мб;

e_{200} – среднее значение упругости водяного пара (абсолютной влажности воздуха) над водоемом на высоте 200 см, мб;

u_{200} – среднее значение скорости ветра над водоемом на высоте 200 см, м/сек.

Величины скорости ветра, максимальной упругости и абсолютной влажности воздуха принимаются средними за месяц и осредняются для всех точек наблюдений над акваторией водоема.

При расчете среднегодовых величин испарения значения гидрометеорологических элементов осредняются за весь период наблюдений для каждого месяца.

При отсутствии данных об абсолютной влажности воздуха, максимальной упругости водяного пара и скорости ветра над водоемом, значения этих элементов рассчитываются по материалам наблюдений на метеорологических станциях, расположенных вблизи водоема.

Для расчета средней скорости ветра над водоемом используются материалы наблюдений по флюгеру нескольких метеорологических станций, одна из которых принимается в качестве опорной, а остальные считаются контрольными и выбираются таким образом, чтобы они отличались от опорной по степени их защищенности. За опорную, принимается станция с наиболее продолжительным рядом наблюдений, местоположение, защищенность и тип флюгера которой не менялись в течение расчетного периода.

Средняя скорость ветра над водоемом на высоте 200 см u_{200} (м/сек) определяется по формуле [9]

$$u_{200} = K_1 K_2 K_3 u_{\phi} \quad (5.2)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий степень защищенности метеорологической станции на суше и принимаемый по таблице 1 в приложении;

K_2 – коэффициент, учитывающий характер рельефа в пункте наблюдений и принимаемый по таблице 2;

K_3 – коэффициент, учитывающий среднюю длину разгона воздушного потока над водоемом L_{cp} при различной его защищенности и принимаемой по таблице в приложении;

u_{ϕ} – скорость ветра на высоте флюгера за расчетный интервал времени, м/сек.

Для определения средней длины разгона воздушного потока на плане водоема строятся две системы прямоугольных сеток из параллельных профилей, ориентированных в первом случае с С на Ю и с З на В, а во втором – с СЗ на ЮВ и с СВ на ЮЗ. Расстояние между профилями выбирается с таким образом, чтобы они пересекали участки водоема с характерными для него сужениями и расширениями. Средняя длина разгона для данного направления профиля L_i вычисляется как среднее арифметическое из длин всех профилей этого направления. Для всей акватории водоема средняя длина разгона вычисляется по формуле

$$L_{cp} = \frac{1}{100} [L_{C-YO}(N_C + N_{YO}) + L_{Z-B}(N_Z + N_B) + L_{CZ-YOB}(N_{CZ} + N_{YOB}) + L_{CB-YOZ}(N_{CB} + N_{YOZ})] \quad (5.3)$$

где L_{C-YO}, L_{Z-B} и т.д. – средняя длина разгона воздушного потока по соответствующим направлениям профилей, км;

$(N_C + N_{YO}), (N_Z + N_B)$ и т.д. – сумма повторяемостей направлений ветра для двух взаимно противоположных румбов, %.

Средняя влажность воздуха над водоемом на высоте 200 см e_{200} (мб) рассчитывается по формуле

$$e_{200} = e'_{200} + (0,8e_0 - e'_{200})M, \quad (5.4)$$

где e'_{200} – средняя за расчетный интервал времени влажность воздуха, измеренная на континентальной метеостанции, мб;

e_0 – максимальная упругость пара за этот же интервал времени, определенная по температуре поверхности воды в водоеме, мб;

M – коэффициент трансформации, учитывающий среднее изменение влажности и температуры воздуха в зависимости от размера водоема.

Коэффициент трансформации определяется по таблице в зависимости от средней длины разгона воздушного потока над водоемом L_{cp} и разности между температурой воды в водоеме и температурой воздуха на метеостанции для одной из трех градаций значений разности ($t_0 - t'_{200}$)

Для прогноза уровней озера Ильмень для периода межени было рассчитано испарение с поверхности воды.

Для выполнения расчетов испарения была собрана информация за 23 года (с 1988 по 2010 гг.) по метеостанции Новгород. С метеорологических ежемесячников были взяты среднемесячные данные парциального давления водяного пара e_2 , скорости ветра w_2 и температуры воздуха. Сведения о температуре воды озера Ильмень взяты из гидрологического ежегодника. Значения максимальной упругости водяного пара e_0 были сняты с таблицы, опубликованной в указании по расчету испарения с поверхности водоемов [9], используя температуру воды. В таблице 5.1 приведены значения испарения, рассчитанного по формуле (5.1).

Таблица 5.1 – Испарение с водной поверхности

Е, мм	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
1988	132.6	216.5	93.7	77.4	53.7
1989	134.5	139.9	119.6	52.8	35.2
1990	133.8	143.5	95.0	52.7	42.7
1991	78.5	135.6	119.6	72.1	42.1
1992	145.5	142.7	103.6	60.7	30.4
1993	94.8	124.3	73.5	42.3	34.7
1994	111.9	127.6	111.7	67.8	37.0
1995	134.9	144.5	129.1	73.0	54.0
1996	100.3	118.0	133.2	73.2	29.5
1997	115.3	167.0	151.5	76.8	37.2
1998	121.6	131.5	120.4	71.1	39.7

Продолжение таблицы 5.1

Е, мм	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
1999	137.4	186.7	143.6	73.4	37.9
2000	170.6	124.7	115.1	83.8	48.0
2001	124.0	159.8	136.6	81.5	25.8
2002	127.0	158.5	169.3	67.8	34.6
2003	112.4	130.7	121.2	75.3	43.3
2004	113.8	140.5	114.0	66.6	42.3
2005	99.7	137.9	138.0	104.1	51.2
2006	116.5	177.8	112.1	78.0	59.3
2007	131.3	120.9	72.4	36.8	29.9
2008	107.9	130.1	66.3	53.4	42.0
2009	78.1	96.9	90.5	70.0	26.7
2010	74.9	112.5	81.9	42.1	25.1

Осадки

По метеостанции Новгород была собрана информация о сумме осадков за месяц за период с 1988 по 2010 года.

Приток поверхностных вод

Оценка притока поверхностных вод к озеру вызывает некоторые сложности. Суммарная площадь водосборов основных притоков – 62 330 км², что составляет 94% от общей площади водосбора. Однако расчетные створы для которых производились прогнозы расположены достаточно далеко от устьев притоков. Общая площадь, освещенная данными наблюдений составила 50 760 км² (76%). Поэтому осуществлялся перенос данных о расходах в замыкающие створы путем пересчета расходов в модули стока.

Сток с площади, неосвещенной данными наблюдений, рассчитывался по данным о среднем модуле стока с бассейнов, на которых проводятся регулярные наблюдения.

Анализ данных показывает, что наибольшее влияние на колебания уровней оказывает поверхностный приток. Выпадающие на зеркало осадки приводят лишь к накладыванию небольших пиков на общую тенденцию хода уровней.

Суммарное внешнее воздействие на водоем определялось как сумма поверхностного притока, осадков, выпадающих на зеркало озера и испарения.

5.2 Параметризация динамической модели водоема

Модель водоема содержит один коэффициент, который нуждается в параметризации – морфометрический коэффициент. Процедура оптимизации была аналогичной процедуре, проводимой для модели склонового стока. Для определения численного значения критерия качества было почитано многолетнее значение среднеквадратического отклонения уровней воды, которое составило – 98 см.

Полученные оптимальные значения морфометрического коэффициента осреднялись за весь период наблюдений. Результаты параметризации сведены в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты параметризации модели водоема

Год	S/σ	$k_{\text{морф}}$
1988	0.23	0.22
1989	0.19	0.26
1990	0.56	0.20
1991	0.25	0.22
1992	0.23	0.24
1993	0.33	0.23
1994	0.32	0.22
1995	0.19	0.23
1996	0.18	0.15
1997	0.33	0.22
1998	0.39	0.20
1999	0.21	0.24
2000	0.36	0.20
2001	0.33	0.26
2002	0.30	0.21
2003	0.21	0.15
2004	0.05	0.21
2005	0.27	0.19
среднее		0.21

5.3 Поверочные прогнозы уровней воды озера Ильмень

Прогноз уровней в замыкающем створе производился по динамической модели водоема. Оценка качества прогноза выполнялась с помощью критерия S/σ . В таблице 5.3. представлены результаты поверочных прогнозов.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы. В среднем значения критерия эффективности составляет 0.51. На рисунке 5.1 приведен пример фактического и прогнозного хода уровней озера Ильмень.

Таблица 5.2 – Результаты поверочных прогнозов уровней воды озера Ильмень

Год	S/σ .
2006	0.42
2007	0.50
2008	0.61

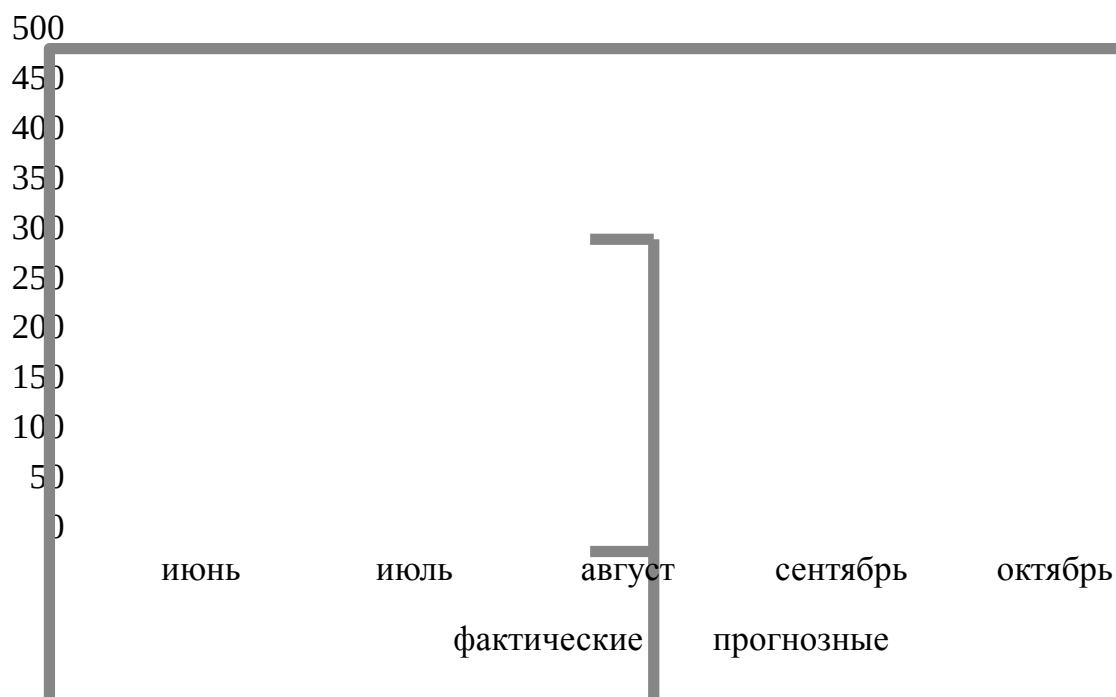


Рисунок 5.1 – Фактический и прогнозный ход уровня озера Ильмень

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью работы была разработка и апробация методики долгосрочных прогнозов расходов воды на наиболее крупных притоках озера Ильмень и уровней озера в летне-осенний период. В основе прогноза лежали динамические модели с сосредоточенными параметрами, которые прошли широкую апробацию на кафедре гидрофизики и гидропрогнозов, особенно для краткосрочных прогнозов. Для долгосрочных прогнозов, особенно уровней воды, апробации не проводилось. Задачи, поставленные в работе заключались в адаптации методики для прогноза в летне-осенний период, когда колебания как расходов воды на притоках, так и уровней воды, вызваны атмосферными осадками.

Для решения поставленной задачи и достижения цели был собран довольно обширный материал, включающий сведения о расходах воды на наиболее крупных притока (реках Мста, Шелонь, Ловать, Пола и Полисть) ти уровней озера, сведения о метеорологических параметрах (атмосферных осадках, температуре воздуха, влажности воздуха, скорости ветра).

На первом этапе разрабатывалась методика прогноза расходов воды на притоках. Параметризация модели проводилась на довольно обширном материале, включающем наблюдения за период 1988 – 2005 гг. Поверочные прогнозы, позволяющие оценить эффективность методики выполнялись за период 2006 – 2010 гг. Полученные результаты позволяют сделать вывод об эффективности работы методики для прогноза расходов воды.

В дальнейшем полученные прогнозные значения использовались в качестве внешнего воздействия при прогнозах уровней воды озера. Помимо расходов притоков учитывалось также испарение и осадки, выпадающие на зеркало озера. Также как и для притоков, сначала была проведена параметризация модели, а затем поверочные прогнозы.

По результатам проделанной работы можно сформулировать основные выводы.

Для прогнозов расходов воды на притоках методика прогноза, основанная на динамической модели склонового стока первого порядка дает удовлетворительные результаты. Изменение численной схемы не дает ожидаемого выигрыша в точности.

Полученные прогнозные значения расходов воды могут быть использованы при прогнозах уровня воды в озере Ильмень. Методика прогноза уровней воды нуждается в дополнительной проработке, так как не дает удовлетворительных результатов. Дальнейшее усовершенствование методики может проводиться в следующих направлениях:

- 1) учет в модели водоема оттока со стороны р. Волхов с использованием информации о расходах притоков р. Волхов – рек Тигоды, Керести и Пчевжи, а также информации об уровне верхнего бьефа Волховской ГЭС;
- 2) усовершенствование методики параметризации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Гембель, А. В. Природа Новгородской области [Текст] / А. В. Гембель. – Институт им. А. И. Герцена, 1963. – 140 с.
- 2 Ресурсы поверхностных вод СССР [Текст] / Т.2. Карелия и Северо – Запад. Ч.2 – Л.: Гидрометеиздат, 1972 – 278 с.
- 3 Руководство по гидрологическим прогнозам. [Текст] / Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 358 с.
- 4 Георгиевский, Ю.М., Шаночкин, С.В. Гидрологические прогнозы [Текст] / Ю.М. Георгиевский, С.В. Шаночкин. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 436 с.
- 5 Коваленко, В.В. Моделирование гидрологических процессов [Текст] / В.В. Коваленко, Н.В. Викторова, Е.В. Гайдукова. – СПб.: изд. РГГМУ, 2006. – 559 с.
- 6 Государственный водный кадастр. Гидрологические ежегодники [Текст]/ Том. 1. Вып. 0 – 5. – 1988 – 2010 гг.
- 7 Сайт ВНИИГМИ-МЦД: <http://meteo.ru/data/506-mesyachnye-summy-osadkov-s-ustraneniem-sistematicheskikh-pogreshnostej-osadkomernykh-priborov>
- 8 Турчак, Л.И., Потлников, П.В. Основы численных методов [Текст]/ Л.И. Турчак, П.В. Плотников. – М.: Физматлит, 2002. – 304 с.
9. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 84 с.

Среднемесячные расходы воды

Год	Среднемесячный расход воды, м ³ /с				
	VI	VII	VIII	IX	X
р. Мста – д. Девкино					
1988	79	57	99	98	91
1989	68	54	169	123	192
1990	66	77	252	332	517
1991	368	252	143	87	93
1992	87	50	37	45	68
1993	72	58	116	140	123
1994	311	89	60	70	99
1995	102	56	39	50	96
1996	60	50	46	36	43
1997	122	64	38	39	85
1998	141	477	333	191	183
1999	95	41	35	34	46
2000	59	216	131	120	88
2001	85	63	44	36	69
2002	53	48	31	32	42
2003	112	289	106	208	278
2004	239	287	154	170	183
2005	261	123	78	63	55
2006	273	62	43	84	149
2007	74	68	79	52	79
2008	58	88	93	191	181
2009	236	136	130	78	221
2010	184	68	49	63	75

Продолжение Приложения А

Год	Среднемесячный расход воды, м ³ /с				
	VI	VII	VIII	IX	X
р. Пола – д. Налючи					
1988	18	18	39	30	31
1989	21	16	70	33	79
1990	18	23	72	116	201
1991	121	58	34	23	27
1992	15	7	7	9	17
1993	14	12	57	55	61
1994	90	24	10	14	20
1995	24	16	10	11	44
1996	13	16	10	8	13
1997	61	13	6	7	33
1998	28	201	145	65	75
1999	16	7	12	8	16
2000	19	147	93	56	24
2001	42	20	14	10	26
2002	14	29	6	6	10
2003	90	104	48	71	134
2004	72	69	26	41	52
2005	151	34	23	12	11
2006	88	11	11	52	64
2007	25	18	25	14	45
2008	10	38	41	81	87
2009	55	33	42	20	142
2010	51	9	8	16	23

Продолжение Приложения А

Год	Среднемесячный расход воды, м ³ /с				
	VI	VII	VIII	IX	X
р.Ловать-д.Холм					
1988	47	57	73	61	65
1989	47	35	109	61	79
1990	46	96	197	400	433
1991	354	142	47	41	47
1992	46	18	12	13	21
1993	23	25	65	115	130
1994	206	47	26	28	30
1995	63	26	16	18	56
1996	34	41	17	21	33
1997	378	85	25	28	123
1998	63	221	180	109	182
1999	32	15	10	7	12
2000	19	157	120	57	26
2001	474	24	23	25	29
2002	28	27	11	10	14
2003	121	111	59	92	189
2004	37	34	22	70	47
2005	269	52	25	18	16
2006	178	15	29	231	184
2007	33	29	23	19	53
2008	36	35	30	54	99
2009	83	79	62	33	272
2010	92	27	16	24	29

Продолжение Приложения А

Год	Среднемесячный расход воды, м ³ /с				
	VI	VII	VIII	IX	X
р.Шелонь-д.Заполье					
1988	7	7	25	35	18
1989	30	11	65	26	50
1990	11	28	100	203	215
1991	79	34	16	12	15
1992	11	6	4	5	10
1993	10	7	9	10	21
1994	75	14	23	20	30
1995	43	11	10	5	11
1996	16	10	4	2	2
1997	155	24	6	3	16
1998	105	143	32	41	38
1999	14	6	3	3	5
2000	6	27	32	30	9
2001	15	10	5	9	18
2002	6	5	2	2	2
2003	40	29	10	30	36
2004	29	44	7	31	27
2005	74	8	10	4	4
2006	63	4	3	87	54
2007	14	8	3	3	11
2008	6	4	13	41	38
2009	80	64	20	44	152
2010	29	14	6		

Продолжение Приложения А

Год	Среднемесячный расход воды, м ³ /с				
	VI	VII	VIII	IX	X
р.Полисть-д.Утушкино					
1988	9	6	6	6	5
1989	7	5	9	8	9
1990	6	6	17	30	44
1991	32	18	10	6	5
1992	12	6	4	2	2
1993	7	4	4	4	7
1994	22	11	6	5	5
1995	13	8	5	3	4
1996	6	4	3	2	2
1997	36	21	10	6	8
1998	11	21	16	12	10
1999	11	7	4	2	2
2000	5	9	10	6	4
2001	9	6	3	2	3
2002	6	4	2	1	1
2003	13	11	9	14	15
2004	8	6	4	9	9
2005	22	11	8	5	3
2006	16	6	4	19	17
2007	8	5	3	2	3
2008	7	4	4	5	7
2009	11	10	6	8	23
2010	11	7	5	4	3

Результаты корреляционного анализа

Месяц	Коэффициент корреляции расходов воды и атмосферных осадков										
	Белогорка	Тихвин	Гдов	Старая Русса	Бологое	Пушкинские Горы	Великие Луки	Торопец	Старица	центр	максимальное
<i>р. Мста – д. Девкино</i>											
Корреляция со сдвижкой 1 месяц											
VI	0.15	0.68	0.10	0.62	0.48	0.58	0.48	0.44	0.49	0.56	0.68
VII	0.55	0.40	0.40	0.58	0.32	0.50	0.08	0.22	0.15	0.44	0.58
VIII	0.44	0.47	0.71	0.73	0.76	0.68	0.62	0.77	0.72	0.78	0.78
IX	0.47	0.60	0.56	0.84	0.50	0.66	0.59	0.47	0.49	0.61	0.84
X	0.15	0.26	0.02	0.33	0.44	0.37	0.48	0.44	0.29	0.41	0.48
Корреляция без сдвижки											
VI	0.45	0.55	0.25	0.40	0.73	0.48	0.31	0.26	0.10	0.73	0.73
VII	0.34	0.44	0.42	0.36	0.76	0.34	0.37	0.69	0.51	0.75	0.76
VIII	0.35	0.32	0.44	0.61	0.34	0.48	0.45	0.40	0.33	0.39	0.61
IX	-0.06	0.24	-0.05	0.29	0.44	0.13	0.43	0.40	0.32	0.40	0.44
X	0.24	0.33	0.02	0.42	0.32	0.23	0.27	0.27	0.02	0.39	0.42

Продолжение Приложения Б

Месяц	Коэффициент корреляции расходов воды и атмосферных осадков										
	Белогорка	Тихвин	Гдов	Старая Русса	Бологое	Пушкинские Горы	Великие Луки	Торопец	Старица	центр	максимальное
Множественная корреляция											
VI	0.50	0.71	0.29	0.68	0.76	0.66	0.58	0.53	0.50	0.80	0.80
VII	0.58	0.59	0.58	0.68	0.87	0.62	0.39	0.70	0.55	0.87	0.87
VIII	0.50	0.50	0.72	0.82	0.81	0.72	0.70	0.79	0.77	0.82	0.82
IX	–	0.67	0.57	0.88	0.67	0.66	0.73	0.64	0.66	0.73	0.88
X	–	0.43	0.03	0.60	0.54	0.38	0.57	0.50	0.29	0.55	0.60
<i>р. Шелонь – д. Заполье</i>											
Корреляция со сдвижкой 1 месяц											
VI	-0.02	0.52	0.30	0.45	0.36	0.42	0.25	0.25	0.46	0.42	0.52
VII	0.46	0.27	0.40	0.60	0.16	0.62	0.20	0.21	-0.11	0.66	0.66
VIII	0.34	0.24	0.56	0.64	0.25	0.62	0.43	0.34	0.42	0.66	0.66
IX	0.22	0.25	0.15	0.59	0.46	0.57	0.55	0.40	0.44	0.53	0.59
X	0.34	0.21	0.08	0.45	0.45	0.57	0.51	0.45	0.28	0.59	0.59

Продолжение Приложения Б

Месяц	Коэффициент корреляции расходов воды и атмосферных осадков										
	Белогорка	Тихвин	Гдов	Старая Русса	Бологое	Пушкинские Горы	Великие Луки	Торопец	Старица	центр	максимальное
Корреляция без сдвижки											
VI	0.24	0.45	0.23	0.60	0.61	0.75	0.57	0.34	0.12	0.71	0.75
VII	0.28	0.28	0.50	0.48	0.75	0.41	0.35	0.68	0.49	0.66	0.75
VIII	0.40	0.20	0.28	0.62	0.39	0.58	0.37	0.25	0.28	0.58	0.62
IX	0.19	0.35	0.09	0.45	0.63	0.54	0.60	0.49	0.24	0.53	0.63
X	0.12	0.29	0.15	0.44	0.29	0.30	0.34	0.29	0.09	0.41	0.44
Множественная корреляция											
VI	0.24	0.55	0.41	0.68	0.63	0.78	0.63	0.44	0.47	0.76	0.78
VII	0.48	0.38	0.63	0.76	0.80	0.77	0.43	0.69	0.50	0.79	0.80
VIII	0.47	0.27	0.56	0.76	0.45	0.72	0.51	0.37	0.49	0.75	0.76
IX		0.45	0.20	0.73	0.79	0.74	0.81	0.65	0.55	0.76	0.81
X		0.36	0.17	0.70	0.53	0.58	0.64	0.52	0.29	0.66	0.70

Продолжение Приложения Б

Месяц	Коэффициент корреляции расходов воды и атмосферных осадков										
	Белогорка	Тихвин	Гдов	Старая Русса	Бологое	Пушкинские Горы	Великие Луки	Торопец	Старица	центр	максимальное
<i>р. Пола – д. Налючи</i>											
Корреляция со сдвижкой 1 месяц											
VI	0.29	0.69	0.45	0.64	0.41	0.75	0.69	0.55	0.32	0.47	0.75
VII	0.42	0.21	0.36	0.48	0.15	0.35	-0.03	0.21	0.23	0.33	0.48
VIII	0.62	0.56	0.73	0.63	0.80	0.77	0.62	0.88	0.72	0.88	0.88
IX	0.52	0.54	0.57	0.82	0.52	0.71	0.67	0.57	0.52	0.72	0.82
X	0.11	0.09	-0.09	0.26	0.29	0.33	0.40	0.34	0.21	0.27	0.40
Корреляция без сдвижки											
VI	0.37	0.54	0.18	0.41	0.85	0.39	0.36	0.31	0.45	0.68	0.85
VII	0.58	0.54	0.51	0.41	0.81	0.52	0.43	0.81	0.54	0.79	0.81
VIII	0.50	0.27	0.53	0.60	0.34	0.54	0.52	0.50	0.34	0.52	0.60
IX	-0.15	0.20	-0.18	0.26	0.46	0.14	0.42	0.34	0.25	0.33	0.46
X	0.39	0.48	0.11	0.58	0.36	0.36	0.44	0.41	0.06	0.52	0.58

Продолжение Приложения Б

Месяц	Коэффициент корреляции расходов воды и атмосферных осадков										
	Белогорка	Тихвин	Гдов	Старая Русса	Бологое	Пушкинские Горы	Великие Луки	Торопец	Старица	центр	максимальное
Множественная корреляция											
VI	0.51	0.72	0.51	0.70	0.85	0.77	0.79	0.65	0.53	0.77	0.85
VII	0.64	0.57	0.61	0.62	0.85	0.65	0.44	0.81	0.62	0.85	0.85
VIII	0.71	0.56	0.77	0.74	0.85	0.81	0.73	0.92	0.78	0.92	0.92
IX	–	0.60	0.58	0.85	0.69	0.71	0.79	0.68	0.64	0.80	0.85
X	–	0.49	0.14	0.70	0.45	0.42	0.62	0.51	0.21	0.59	0.70
<i>р. Ловать – д. Холм</i>											
Корреляция со сдвижкой 1 месяц											
VI	-0.10	0.41	0.38	0.16	0.19	0.55	0.34	0.29	0.31	0.33	0.55
VII	0.32	0.23	0.25	0.55	0.28	0.52	0.28	0.41	0.24	0.34	0.55
VIII	0.53	0.48	0.75	0.74	0.58	0.81	0.61	0.70	0.61	0.67	0.81
IX	0.17	0.26	0.25	0.58	0.48	0.58	0.53	0.47	0.44	0.54	0.58
X	0.25	0.18	0.03	0.36	0.44	0.54	0.59	0.50	0.32	0.56	0.59

Продолжение Приложения Б

Месяц	Коэффициент корреляции расходов воды и атмосферных осадков										
	Белогорка	Тихвин	Гдов	Старая Русса	Бологое	Пушкинские Горы	Великие Луки	Торопец	Старица	центр	максимальное
Корреляция без сдвижки											
VI	0.30	0.30	0.30	0.30	0.68	0.36	0.27	0.29	0.32	0.28	0.68
VII	0.48	0.49	0.57	0.49	0.64	0.62	0.47	0.74	0.40	0.51	0.74
VIII	0.43	0.21	0.41	0.63	0.40	0.60	0.51	0.45	0.36	0.54	0.63
IX	0.07	0.28	0.03	0.33	0.60	0.52	0.68	0.54	0.32	0.66	0.68
X	0.28	0.46	0.21	0.54	0.30	0.34	0.39	0.41	0.16	0.40	0.54
Множественная корреляция											
VI	0.31	0.42	0.52	0.32	0.69	0.58	0.44	0.43	0.43	0.45	0.69
VII	0.51	0.54	0.62	0.73	0.74	0.83	0.58	0.80	0.50	0.64	0.83
VIII	0.61	0.48	0.75	0.83	0.69	0.86	0.72	0.75	0.70	0.78	0.86
IX	–	0.40	0.26	0.65	0.77	0.74	0.86	0.74	0.62	0.87	0.87
X	–	0.50	0.22	0.72	0.52	0.56	0.74	0.63	0.34	0.70	0.74

Продолжение Приложения Б

Месяц	Коэффициент корреляции расходов воды и атмосферных осадков										
	Белогорка	Тихвин	Гдов	Старая Русса	Бологое	Пушкинские Горы	Великие Луки	Торопец	Старица	центр	максимальное
<i>р. Полисть – с. Утушкино</i>											
Корреляция со сдвижкой 1 месяц											
VI	-0.05	0.52	0.30	0.42	0.40	0.57	0.45	0.48	0.35	0.49	0.57
VII	0.32	0.41	0.31	0.61	0.51	0.73	0.47	0.38	0.15	0.66	0.73
VIII	0.36	0.30	0.61	0.56	0.44	0.63	0.45	0.57	0.38	0.60	0.63
IX	0.20	0.28	0.19	0.65	0.52	0.61	0.56	0.49	0.56	0.63	0.65
X	0.31	0.29	0.09	0.38	0.49	0.58	0.58	0.50	0.31	0.53	0.58
Корреляция без сдвижки											
VI	0.12	0.42	0.07	0.34	0.65	0.52	0.51	0.30	0.20	0.44	0.65
VII	0.00	0.01	0.14	0.01	0.30	0.08	0.01	0.30	0.01	0.04	0.30
VIII	0.23	0.07	0.21	0.50	0.28	0.40	0.31	0.27	0.33	0.44	0.50
IX	0.20	0.39	0.10	0.27	0.50	0.51	0.54	0.45	0.21	0.45	0.54
X	0.18	0.37	0.14	0.48	0.31	0.29	0.32	0.33	0.11	0.42	0.48

Продолжение Приложения Б

Месяц	Коэффициент корреляции расходов воды и атмосферных осадков										
	Белогорка	Тихвин	Гдов	Старая Русса	Бологое	Пушкинские Горы	Великие Луки	Торопец	Старица	центр	максимальное
Множественная корреляция											
VI	0.13	0.55	0.32	0.50	0.67	0.68	0.69	0.59	0.39	0.63	0.69
VII	0.34	0.41	0.33	0.61	0.63	0.74	0.47	0.46	0.15	0.66	0.74
VIII	0.39	0.31	0.61	0.64	0.51	0.65	0.49	0.58	0.49	0.65	0.65
IX	–	0.51	0.24	0.70	0.72	0.76	0.77	0.68	0.66	0.80	0.80
X	–	0.48	0.17	0.68	0.57	0.59	0.68	0.58	0.32	0.66	0.68

Результаты параметризации модели склонового стока

Год	Метод Эйлера (осадки предыдущие)			Метод Эйлера (осадки текущие)		
	S/σ	k	τ	S/σ	k	τ
<i>р. Ловатъ – д. Холм</i>						
1988	0.19	0.11	1.35	0.3	0.1	1.2
1989	0.52	0.02	5.5	0.37	0.13	1.68
1990	0.8	0.84	4.93	0.78	1	7.01
1991	1.4	0.01	3.23	1.75	0.35	1
1992	0.04	0.06	1.11	0.04	0.05	1.2
1993	0.25	0.19	1.38	0.43	0.25	3.9
1994	0.48	0.08	1.93	0.45	0.13	1.91
1995	0.12	0.09	1.1	0.22	0.07	1.28
1996	0.12	0.06	1.21	0.16	0.06	1.08
1997	1.76	0.02	2.46	0.91	0.34	1.3
1998	0.81	0.24	1	0.87	0.24	1
1999	0.06	0.03	1.18	0.05	0.03	1.16
2000	0.71	0.17	1	0.28	0.21	1.09
2001	2.51	0.23	1.14	2.51	0.24	1
2002	0.04	0.05	1.7	0.08	0.03	1.71
2003	0.93	0.1	1.77	0.81	0.17	1.37
2004	0.21	0.1	1.07	0.21	0.09	1
2005	0.82	0.01	2.35	0.69	0.27	1

Продолжение Приложения В

Год	Метод Рунге-Кутта (осадки предыдущие)			Метод Рунге-Кутта (осадки текущие)		
	S/σ	k	τ	S/σ	k	τ
1988	0.21	0.11	1	0.32	0.09	1
1989	0.52	0.02	4.98	0.37	0.13	1.09
1990	0.8	0.84	4.41	0.78	1	6.5
1991	1.4	0.01	2.69	0.95	0.35	1
1992	0.29	0.01	1	0.28	0.01	1
1993	0.25	0.2	1	0.43	0.25	3.38
1994	0.48	0.08	1.36	0.45	0.13	1.34
1995	0.24	0.05	1	0.26	0.05	1
1996	0.18	0.05	1	0.22	0.03	1
1997	1.76	0.02	1.91	0.96	0.37	1
1998	0.91	0.25	1	0.96	0.24	1
1999	0.23	0.01	1	0.24	0.01	1
2000	0.79	0.14	1	0.39	0.24	1
2001	2.6	0.14	1	2.67	0.24	1
2002	0.04	0.05	1.12	0.08	0.03	1.13
2003	0.93	0.1	1.2	0.82	0.15	1
2004	0.26	0.09	1	0.28	0.08	1
2005	0.82	0.01	1.8	0.75	0.17	1

Продолжение Приложения В

Год	Метод Эйлера (осадки предыдущие)			Метод Эйлера (осадки текущие)		
	S/σ	k	τ	S/σ	k	τ
<i>р. Мста – д. Девкино</i>						
1988	0.24	0.11	1.2	0.38	0.1	1.27
1989	0.86	0.14	3.3	0.44	0.19	1.63
1990	0.78	1	6.18	1.02	1	8.15
1991	0.8	0.01	5.36	0.33	0.29	1.39
1992	0.11	0.11	1.18	0.11	0.08	1.28
1993	0.26	0.16	1.13	0.57	0.13	1.17
1994	0.54	0.08	1.79	0.56	0.07	1.84
1995	0.22	0.11	1.13	0.29	0.1	1.23
1996	0.13	0.09	1.2	0.21	0.09	1.14
1997	0.22	0.09	1.22	0.26	0.08	1.16
1998	1.93	0.2	1.23	1.02	0.24	1
1999	0.14	0.07	1.31	0.11	0.24	1.32
2000	0.72	0.14	1	0.42	0.15	1.01
2001	0.21	0.07	2.56	0.04	0.11	1
2002	0.12	0.08	1.59	0.15	0.06	1.5
2003	1.26	0.23	1.62	1.6	0.01	5.16
2004	0.72	0.01	8.07	0.38	0.22	1.16
2005	0.46	0.01	3.34	0.2	0.23	1

Продолжение Приложения В

Год	Метод Рунге-Кутта (осадки предыдущие)			Метод Рунге-Кутта (осадки текущие)		
	S/σ	k	τ	S/σ	k	τ
1988	0.36	0.09	1	0.44	0.08	1
1989	0.86	0.14	2.76	0.44	0.19	1.04
1990	0.78	1	5.66	1.02	1	7.63
1991	0.8	0.01	4.85	0.35	0.35	1
1992	0.35	0.07	1	0.3	0.07	1
1993	0.56	0.15	1	0.71	0.12	1
1994	0.54	0.08	1.22	0.56	0.07	1.27
1995	0.4	0.07	1	0.4	0.07	1
1996	0.27	0.06	1	0.31	0.03	1
1997	0.44	0.05	1	0.48	0.03	1
1998	1.96	0.18	1	0.74	0.27	1
1999	1.96	0.26	1	0.74	0.05	1
2000	0.83	0.13	1	0.61	0.15	1
2001	0.21	0.07	2.02	0.13	0.1	1
2002	0.12	0.08	1	0.16	0.06	1
2003	1.26	0.23	1.03	1.6	0.01	4.64
2004	0.72	0.01	7.56	0.43	0.22	1
2005	0.46	0.01	2.81	0.31	0.18	1

Продолжение Приложения В

Год	Метод Эйлера (осадки предыдущие)			Метод Эйлера (осадки текущие)		
	S/σ	k	τ	S/σ	k	τ
<i>р. Пола – д. Налючи</i>						
1988	0.31	0.13	1.01	0.34	0.13	1.14
1989	1.11	0.08	6.82	0.65	0.23	1.44
1990	0.81	1	5.99	1.21	1	9.45
1991	1.07	0.01	4.14	0.25	0.27	1
1992	0.08	0.09	1.02	0.05	0.06	1.1
1993	0.35	0.23	1.04	0.71	0.2	1.48
1994	0.38	0.03	1.84	0.35	0.07	1.7
1995	0.36	0.12	1	0.44	0.12	1.11
1996	0.1	0.07	1.1	0.15	0.07	1.05
1997	0.44	0.07	1.6	0.27	0.11	1.39
1998	1.95	0.27	1	0.97	0.33	1.25
1999	0.15	0.07	1.17	0.09	0.07	1.18
2000	1.31	0.75	1	0.75	1.57	1.17
2001	0.37	0.01	5.23	0.23	0.14	1
2002	0.13	0.12	1.16	0.31	0.07	1.32
2003	1.21	0.39	9.48	1.23	0.01	100
2004	0.58	0.01	6.66	0.5	0.2	1.47
2005	1.39	0.01	2.62	0.89	0.42	1

Продолжение Приложения В

Год	Метод Рунге-Кутта (осадки предыдущие)			Метод Рунге-Кутта (осадки текущие)		
	S/σ	k	τ	S/σ	k	τ
1988	0.42	0.11	1	0.41	0.12	1
1989	1.11	0.02	4.98	0.65	0.25	1
1990	0.81	1	5.47	1.21	1	8.94
1991	1.07	0.01	3.61	0.54	0.28	1
1992	0.45	0.01	1	0.43	0.04	1
1993	0.48	0.25	1	0.71	0.2	1
1994	0.38	0.03	1.27	0.35	0.07	1.12
1995	0.54	0.07	1	0.52	0.1	1
1996	0.26	0.04	1	0.28	0.02	1
1997	0.44	0.07	1	0.3	0.1	1
1998	2.25	0.25	1	1.1	0.37	1
1999	0.25	0.04	1	0.22	0.05	1
2000	1.57	0.25	1	0.88	0.36	1
2001	0.37	0.01	4.71	0.28	0.13	1
2002	0.19	0.12	1	0.31	0.06	1
2003	1.21	0.39	8.97	1.23	0.01	100
2004	0.58	0.01	6.14	0.51	0.19	1
2005	1.39	0.01	2.08	1.12	0.36	1

Продолжение Приложения В

Год	Метод Эйлера (осадки предыдущие)			Метод Эйлера (осадки текущие)		
	S/σ	k	τ	S/σ	k	τ
<i>р. Полисть – с. Утушкино</i>						
1988	0.1	0.1	1.84	0.25	0.08	2.01
1989	0.46	0.09	1.26	0.32	0.14	2.17
1990	1	1	7.37	1.61	1	13.49
1991	1.29	0.01	4.56	0.63	0.41	1
1992	0.04	0.05	1.85	0.02	0.04	1.92
1993	0.23	0.11	1.73	0.31	0.09	1.76
1994	0.44	0.09	2.64	0.44	0.09	2.75
1995	0.1	0.11	1.77	0.14	0.08	2.1
1996	0.09	0.05	1.9	0.08	0.05	1.75
1997	1.9	0.22	2.78	1.33	0.39	2.11
1998	0.63	0.23	1	0.63	0.23	1.35
1999	0.09	0.05	1.88	0.1	0.04	1.89
2000	0.36	0.15	1.14	0.19	0.16	1.77
2001	0.16	0.01	3.07	0.12	0.07	2.16
2002	0.06	0.01	2.48	0.05	0.02	2.36
2003	0.49	0.18	3.95	0.56	0.01	10.46
2004	0.41	0.15	1.4	0.44	0.15	1.14
2005	0.35	0.01	2.81	0.27	0.28	1.5

Продолжение Приложения В

Год	Метод Рунге-Кутта (осадки предыдущие)			Метод Рунге-Кутта (осадки текущие)		
	S/σ	k	τ	S/σ	k	τ
1988	0.1	0.1	1.27	0.25	0.08	1.44
1989	0.46	0.09	3.74	0.32	0.14	1.62
1990	1	1	6.86	1.61	1	12.99
1991	1.29	0.01	4.04	0.84	0.37	1
1992	0.04	0.05	1.28	0.02	0.04	1.35
1993	0.23	0.11	1.15	0.31	0.09	1.18
1994	0.44	0.09	2.1	0.44	0.09	2.21
1995	0.1	0.11	1.19	0.14	0.08	1.54
1996	0.09	0.05	1.33	0.08	0.05	1.17
1997	1.9	0.22	2.25	1.33	0.39	1.56
1998	0.73	0.22	1	0.64	0.23	1
1999	0.09	0.05	1.31	0.1	0.04	1.33
2000	0.38	0.14	1	0.19	0.16	1.19
2001	0.16	0.01	2.54	0.12	0.07	1.61
2002	0.06	0.01	1.94	0.05	0.02	1.81
2003	0.49	0.18	3.42	0.56	0.01	9.95
2004	0.42	0.15	1	0.47	0.14	1
2005	0.35	0.01	2.27	0.27	0.26	1

Продолжение Приложения В

Год	Метод Эйлера (осадки предыдущие)			Метод Эйлера (осадки текущие)		
	S/σ	k	τ	S/σ	k	τ
<i>р. Шелонь – д. Заполье</i>						
1988	0.22	0.09	1.03	0.38	0.07	1.45
1989	0.94	1	5.41	1.48	1	8.39
1990	0.9	1	5.37	1.46	1	8.28
1991	0.62	0.01	3.54	0.32	0.2	1
1992	0.04	0.06	1.04	0.04	0.05	1.11
1993	0.21	0.05	1.4	0.23	0.05	1.37
1994	0.64	0.14	1.57	0.6	0.16	1.76
1995	0.22	0.02	1.91	0.21	0.05	1.7
1996	0.06	0.02	1.37	0.04	0.02	1.34
1997	1.63	0.01	2.33	1.3	0.23	1.54
1998	1.56	0.24	1	0.93	0.28	1
1999	0.04	0.03	1.3	0.03	0.03	1.27
2000	0.17	0.09	1.02	0.3	0.1	1.95
2001	0.18	0.04	2.04	0.14	0.06	1
2002	0.02	0.02	1.27	0.05	0.02	1.2
2003	0.41	0.08	1.38	0.52	0.05	1.52
2004	0.28	0.13	1	0.46	0.12	1
2005	0.41	0.01	1.73	0.38	0.08	1.5

Продолжение Приложения В

Год	Метод Рунге-Кутта (осадки предыдущие)			Метод Рунге-Кутта (осадки текущие)		
	S/σ	k	τ	S/σ	k	τ
1988	0.29	0.09	1	0.39	0.07	1
1989	0.94	1	4.89	1.48	1	7.87
1990	0.9	1	4.85	1.46	1	7.77
1991	0.62	0.01	3.01	0.4	0.18	1
1992	0.34	0.01	1	0.33	0.02	1
1993	0.21	0.05	1	0.23	0.05	1
1994	0.64	0.14	1	0.6	0.16	1.18
1995	0.22	0.02	1.34	0.21	0.05	1.12
1996	0.09	0.01	1	0.08	0.01	1
1997	1.63	0.01	1.78	1.3	0.23	1
1998	1.62	0.22	1	1.25	0.28	1
1999	0.11	0.01	1	0.11	0.01	1
2000	0.23	0.1	1	0.3	0.1	1.39
2001	0.18	0.04	1.48	0.16	0.05	1
2002	0.07	0.01	1	0.08	0.01	1
2003	0.44	0.07	1	0.52	0.05	1
2004	0.42	0.14	1	0.51	0.12	1
2005	0.41	0.01	1.15	0.39	0.06	1

Приложение Г

Фактические и прогнозные гидрографы стока основных притоков озера Ильмень

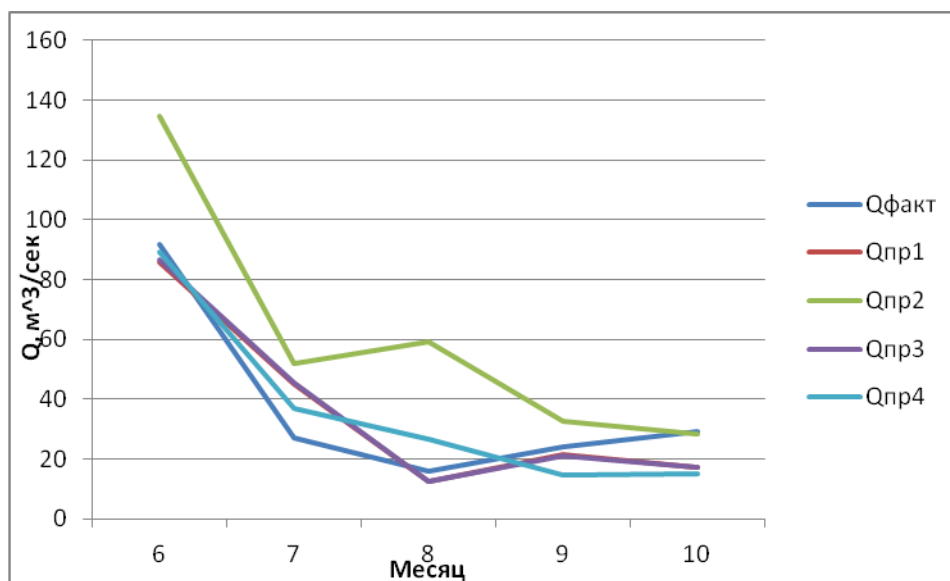


Рисунок Г.1 – Прогнозный гидрограф р.Ловать – д.Холм (2010 г.)

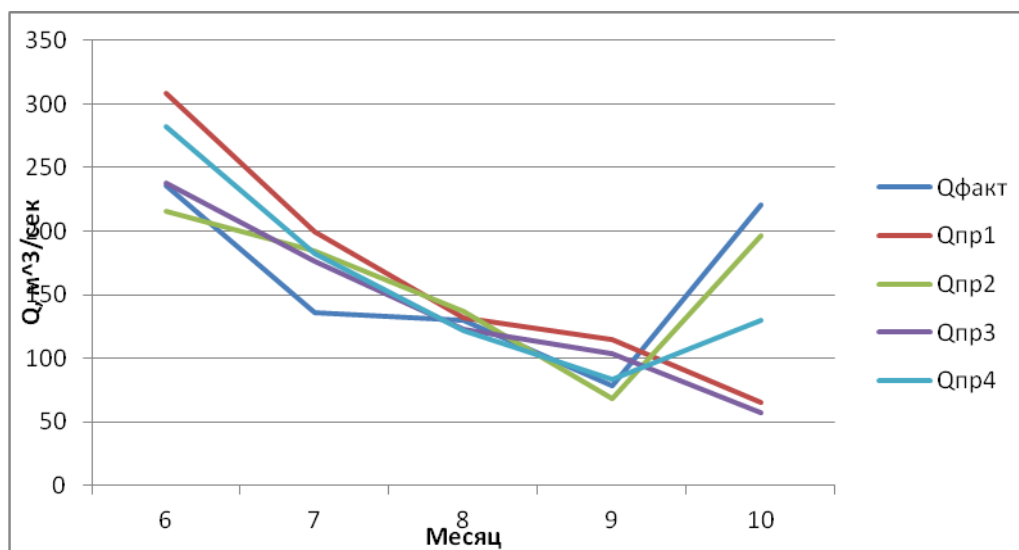


Рисунок Г.2 – Прогнозный гидрограф р.Мста – д.Девкино (2009 г.)

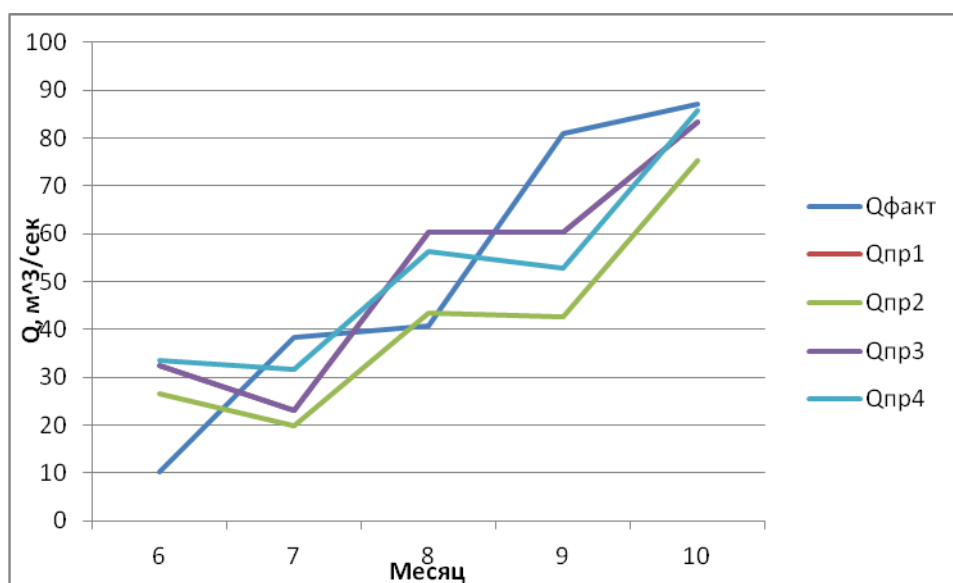


Рисунок Г.3 – Прогнозный гидрограф р.Пола – д.Налючи (2008 г.)

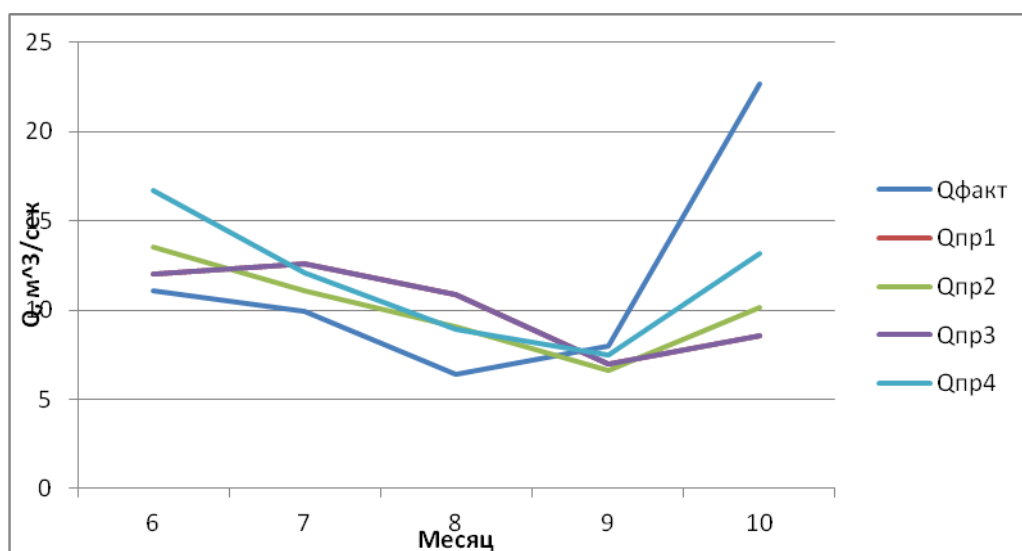


Рисунок Г.4 – Прогнозный гидрограф р.Полисть – д.Утушкино (2009 г.)

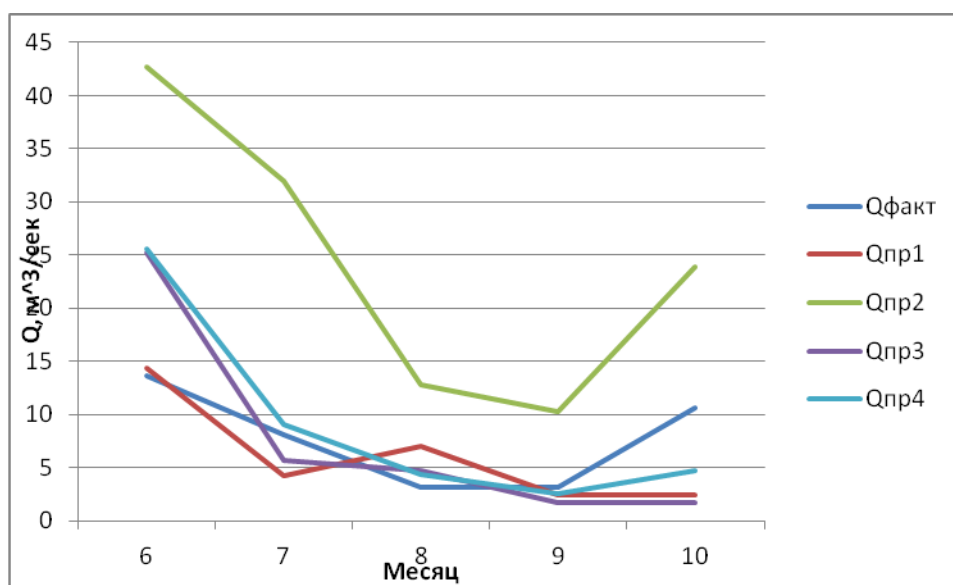


Рисунок Г.5 – Прогнозный гидрограф р.Шелонь – д.Заполье (2007 г.)