



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

Кафедра водно-технических изысканий

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему _____

**Факторы изменчивости
водности озера Ильмень
в XX-начале XXI веков**

Исполнитель _____

Бушуев Артур Вадимович

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель _____

Профессор д.г.н доцент

(ученая степень, ученое звание)

Соколова Александра Александровна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

доцент, к.г.н.

(ученая степень, ученое звание)

Шев Д. И.

(фамилия, имя, отчество)

«02» июня 2025г.

Санкт-Петербург

2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ И КЛИМАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ.....	5
1.1 Общие сведения	5
1.2 Климатическая характеристика.....	6
1.3 Характеристика рельефа	9
1.4 Геологическое строение.....	12
1.5 Почвы и растительность	15
1.6 Гидрографическая характеристика бассейна озера Ильмень	16
2. ОЦЕНКА ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ВОДНОСТЬ ПАРАМЕТРОВ.....	21
2.1 Многолетний анализ водности озера Ильмень при использовании квантильного метода.....	22
2.2 Водный баланс озера Ильмень за расчетный год средней водности	24
2.2.1 Определение приходных составляющих	26
2.2.2 Определение расходных составляющих	29
2.2.3 Определение аккумуляционных составляющих и невязки.....	35
2.2.4 Сведение водного баланса	38
3. АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ УРОВЕННОГО РЕЖИМА ОЗЕРА ИЛЬМЕНЬ ОТ ПРИТОКА ВПАДАЮЩИХ РЕК.....	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	44
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	45
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	47

ВВЕДЕНИЕ

В работе исследуется водный режим озера Ильмень за период XX-начала XXI веков, а также особенности зависимости водности озера от основных рек-притоков – рек Мсты, Ловати и Шелони. Отмечается, что озеро Ильмень является предметом серьезной антропогенной нагрузки, такой как использование озера в целях водного хозяйства (рыбоводство, водный туризм, забор (изъятие) для технических нужд, орошение и т.д.), а также озеро Ильмень является водохранилищем Волховской гидроэлектростанции (ГЭС-6), хранящее огромное количество воды, сток которой, через реку Волхов зарегулирован деятельностью гидроэнергетики. Антропогенное воздействие глубоко влияет на водный режим водоема, как в многолетнем разрезе, так и во внутригодовом прочтении. Однако, в настоящей выпускной квалификационной работе будет рассмотрено исключительно многолетнее изменение водности озера.

Исследование водности в многолетнем разрезе выполнено в соответствии с методами квантильного анализа и хронологической статистики. Для выполнения соответствующих работ были использованы ряды средних многолетних расходов воды на реках-притоках озера Ильмень, а также его собственный многолетний ряд среднегодовых уровней воды в расчетном створе д. Войцы.

Главные задачи исследования:

- Дать краткую физико-географическую и климатическую характеристику района исследований;
- Выполнить расчёт водного баланса озера Ильмень с целью определения основных приходных составляющих;
- Оценить влияние рек-притоков на водность озера Ильмень в многолетнем разрезе.

Работа состоит из 3 глав, введения и заключения.

В первой главе представлена краткая физико-географическая и климатическая характеристика района исследований. Приводятся сведения о рельефе региона, почве, растительности и гидрологической изученности.

Во второй главе проводится расчет определяющих водность параметров, для чего был выполнен расчет водного баланса озера Ильмень, по, предварительно определенному методом квантильного анализа, расчетному году средней водности.

В третьей главе выполняется оценка рядов среднегодовых расходов воды на основных притоках озера и сравнение их с ходом уровня в многолетнем разрезе, также производится анализ зависимости уровня воды в озере с расходами рек-притоков.

В заключении представлены основные результаты проделанной работы.

Бакалаврская работа содержит 14 рисунков, 17 таблиц и список использованных источников из 12 наименований. Общий объем работы 54 страницы.

1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ И КЛИМАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Общие сведения

Новгородская область расположена на северо-западе Европейской части России. Граничит на севере с Ленинградской, на северо-востоке – в Вологодской, на юго-востоке и юге – с Тверской, на западе – с Псковской областями. Находится на Русской (Восточно-Европейской) равнине, в пределах плоской, местами заболоченной Приильменской низменности (от 18 до 50 м над уровнем моря).

Ильмень, как и Ладожское озеро, входит в список Великих Европейских озер. Его водные и экологические богатства активно используются в хозяйственной деятельности. Кроме того, Ильмень выполняет важную роль в регулировании стока реки Волхов, в нижнем течении которой расположена Волховская ГЭС. Озеро и прилегающая к нему территория образуют инерционную систему, способную фиксировать изменения климата, причем с большей чувствительностью, чем вся Ладожская система. Изменение уровня воды в озере влечет за собой колебания водных ресурсов, интенсивности внешнего водообмена и самоочищения, а также стока реки Волхов и других показателей. Такие колебания уровня обусловлены изменчивостью и соотношением компонентов водного баланса.

Озеро Ильмень расположено на Северо-Западе России в зоне с избыточным и достаточным уровнем увлажнения. Площадь его бассейна составляет 67 200 км² и является частью бассейна Ладожского озера, находясь в его южной области. В озеро впадают пять крупных рек, а также множество ручьев и малых рек. Ильмень является проточным озером, из которого вытекает река Волхов. Река Ловать, впадающая в озеро Ильмень, начинается в Белоруссии, и её исток представляет собой наиболее удалённую точку от устья реки Невы, которая вытекает из Ладожского озера.

Озеро Ильмень связано с Ладожским озером через реку Волхов, протяженность которой составляет 224 км. Средний многолетний уровень воды в Ильмене фиксируется на отметке 18 м над уровнем моря. Площадь озера варьируется и колеблется в пределах от 700 до 2200 км² в зависимости от водности в разные периоды. Эти изменения в размерах также обусловлены особенностями конструкции котловины. Тем не менее, глубины озера также подвержены значительным изменениям с течением времени.

В качестве средних многолетних характеристик большинство исследователей принимают: площадь озера 1100 км², объем воды 3,0 км³, длина озера 45 км, ширина 35 км.

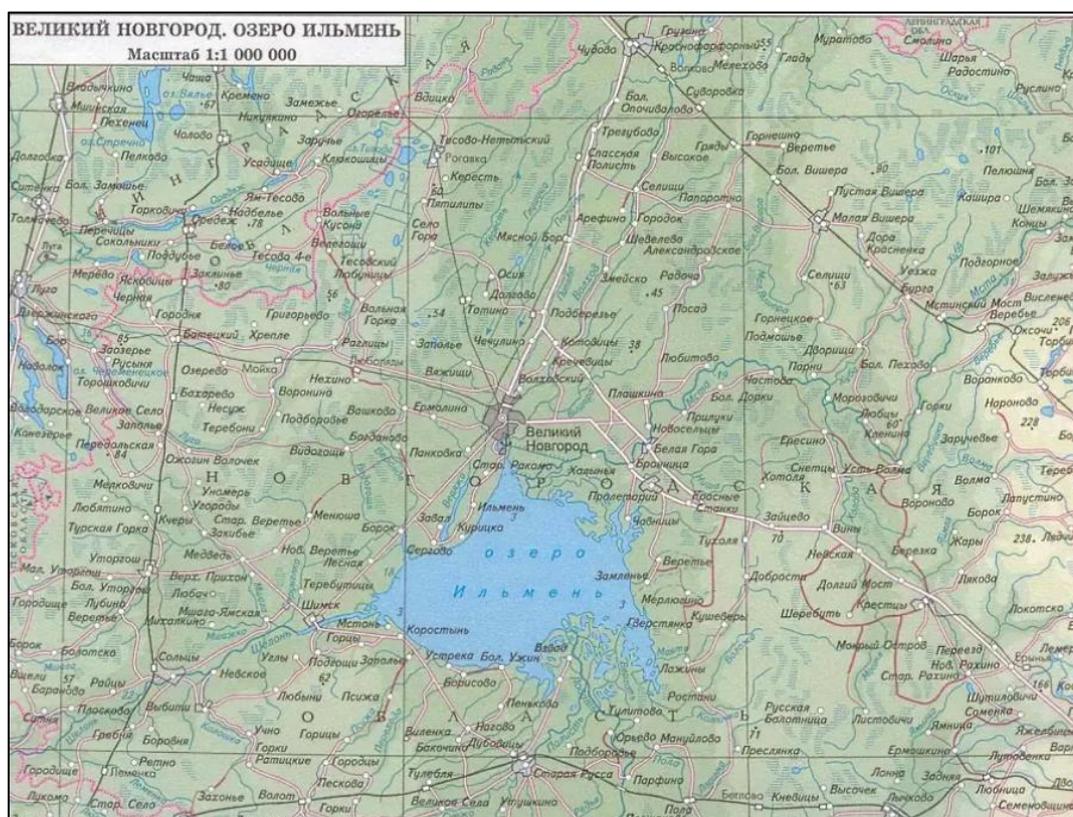


Рисунок 1.1 – Географическое положение озера Ильмень

1.2 Климатическая характеристика

Климат территории бассейна озера Ильмень является переходным от морского к континентальному.

За начало весны принимается устойчивый переход средней суточной температуры воздуха через ноль градусов, что происходит в районе работ в

среднем 1 апреля. Период с положительными средними суточными температурами составляет в среднем 215-219 дней. Между датами перехода температуры через ноль и разрушения устойчивого снежного покрова обычно проходит не более 7-10 дней. Весна характеризуется частыми возвратами холодов, а иногда и кратковременными установлениями снежного покрова.

Лето, за начало которого принимается переход температуры воздуха через 10 градусов, наступает обычно в середине мая. Средняя продолжительность лета около 4 месяцев. В летнем сезоне выделяется период среднесуточных температур выше 15 градусов, который начинается во второй декаде июня и заканчивается во второй декаде августа.

Осень наступает, как правило, в середине сентября. Продолжительность осени около двух месяцев.

Зима начинается в первой декаде ноября. Первая половина зимы, или так называемое предзимье, характеризуется преобладанием ненастной погоды с дождями и мокрым снегом. С 2-6 декабря среднесуточная температура воздуха переходит через минус 5 градусов; этот период длится в среднем до 14 марта, т.е. в среднем 2 месяца

Количество и распределение осадков в течение всего года определяется, главным образом, циклонической деятельностью атмосферы и особенностями рельефа. В зависимости от вида атмосферных осадков год принято делить на два периода: период с преимущественным выпадением твердых осадков считается холодным периодом, а с преобладанием жидких осадков – теплым.

Территория относится к зоне избыточного увлажнения. Среднемноголетнее годовое количество осадков с поправками на смачивание изменяется в пределах территории от 600 мм до 709 мм. Наименьшее месячное количество осадков, как правило, наблюдается в феврале-марте и составляет 27–36 мм, наибольшее – в июле-августе 72–90 мм.

Снежный покров является одним из существенных факторов, оказывающих влияние на формирование климата. Вследствие малого прихода солнечной радиации в зимнее время и большой отражательной способности снега температура прилегающего слоя воздуха сильно понижается. В то же время, являясь плохим проводником тепла, снег предохраняет почву от глубокого промерзания. Условия залегания снежного покрова определяются датами появления и схода снежного покрова, образования и разрушения устойчивого снежного покрова, высотой снежного покрова, числом дней в году со снежным покровом.

Снежный покров появляется обычно в конце октября - начале ноября, но он, как правило, держится недолго. Устойчивый снежный покров образуется в конце ноября – начале декабря и разрушается в первой декаде апреля. Окончательно снег сходит обычно в середине апреля. Высота снежного покрова достигает максимума обычно в феврале-марте. Наибольшая за зиму мощность снежного покрова может достигать 65-71 см. Среднее число дней со снежным покровом – 141-146 см.

Влажность воздуха – один из элементов увлажнения, имеющий большое значение для многих отраслей народного хозяйства. Водяной пар является неустойчивой составной частью атмосферы, содержание его сильно меняется в зависимости от физико-географических условий местности, времени года и циркуляционных особенностей атмосферы, состояния почвы и т.п.

О влажности воздуха можно судить по величине упругости водяного пара, относительной влажности воздуха и по недостатку насыщения воздуха водяным паром.

Упругость водяного пара наименьших значений достигает зимой, в январе и феврале. С марта начинается увеличение упругости водяного пара, особенно интенсивное при переходе от мая к июню (на 3,8 гПа), а максимальных значений достигает в июле-августе.

Относительная влажность воздуха, характеризующая степень насыщения воздуха водяным паром, меняется в течение года в широких пределах.

С февраля-марта начинается понижение относительной влажности, наиболее интенсивно оно от марта к апрелю. Относительная влажность воздуха достигает минимума в июне (71-72 %), а максимум приходится на ноябрь-декабрь (86-88 %).

Начиная с апреля недостаток насыщения увеличивается и достигает максимума в июне-июле.

Над территорией в течение года наблюдаются ветры западного, юго-западного, юго-восточного и южного направлений. Повторяемость ветров этих направлений, как правило, составляет более 63%. В долинах рек преобладают ветры, дующие вдоль долин. Наименьшие скорости наблюдаются в лесных районах. Вблизи крупных водоемов скорость ветра возрастает. Средняя многолетняя годовая величина скорости ветра составляет 3,3-4,4 м/с. Наименьшие месячные скорости ветра, как правило, наблюдаются в июле – августе и составляют 2,6-4,4 м/с.

Средние многолетние годовые величины суммарного испарения с суши изменяются с севера на юг от 350-550 мм. Средняя многолетняя годовая величина испарения с водной поверхности изменяется по территории бассейна от 568–585 мм. Наибольшие месячные величины испарения с водной поверхности, как правило, наблюдаются в июне-июле и составляют 122-131 мм.

1.3 Характеристика рельефа

Исследуемая территория находится на северо-западе Восточно-Европейской (Русской) равнины, на относительно выровненной поверхности Волховской низменности к востоку и юго-востоку от Путиловского глинта (плато). В пределах исследуемой территории выделяются участки, принадлежащие долине р. Волхов, заложившейся здесь по ослабленной зоне

контакта ордовикских и девонских структур, а также участки слабоволнистой слаборасчлененной озерно-ледниковой равниной со средними высотами 45-53 м.

При геологическом районировании территории выделяются две неравные части: западная и восточная. Наиболее древние коренные отложения находятся на западе – небольшой меридианально ориентированный западнее долины р. Волхов. Они представлены известняками и доломитами Солецкой и Грязновской свитами Карадокского яруса верхнего ордовика.

Четвертичные отложения представлены двумя крупными группами: озерно-ледниковыми и аллювиальными отложениями. Наиболее древними четвертичными отложениями здесь являются озерно-ледниковые, распространенные по обоим бортам долины Волхова. Они относятся к Осташковскому горизонту Валдайского надгоризонта верхнего плейстоцена и представлены песками, глинами, в том числе ленточными, суглинками, супесями, гравийно-галечными песками. Мощность этой генетической пачки отложений может достигать 40-45 м. При этом, согласно карте четвертичных отложений (Государственная геологическая карта РФ, 2012), к западу от Волхова на междуречных пространствах преобладают песчаные отложения, а к востоку – глинистые. Аллювиальные отложения имеют голоценовый возраст и могут быть представлены песками, галечниками, супесями, глинами (мощностью до 20 м).

Рельеф изучаемой территории представлен несколькими экзогенными генетическими типами: флювиальный, озерно-ледниковый, склоновый, антропогенный и биогенный, при этом преобладают аккумулятивные и аккумулятивно-денудационные формы рельефа.

Наибольшие площади заняты озерно-ледниковыми отложениями. Они слагают озерно-ледниковую, полого-холмистую слабо террасированную равнину с общим перепадом высот в пределах изучаемой территории – 10-17 м. Возвышенные участки представляют собой изометричные в плане формы

с пологими склонами, крутизной 3-7°. В редких случаях крутизна достигает 10-12°. Местами равнина заболочена.

Флювиальный рельеф представлен долинами р. Волхов и его притоками – р. Жупка на северо-востоке и р. Сестра на юго-западе территории. Склоновые процессы распространены на пологих уступах террас озерно-ледниковой равнины, а также уступах поймы р. Волхов и бортах малых рек.

Биогенный рельеф представлен, в основном микро-формами: болотными и луговыми кочками в пределах зон подтопления и заболачивания, муравейниками.

Широко представлен антропогенный рельеф. На участках распространены техногенные выровненные площадки, понижения и склоны, а незадернованных участках которых могут развиваться склоновые процессы.

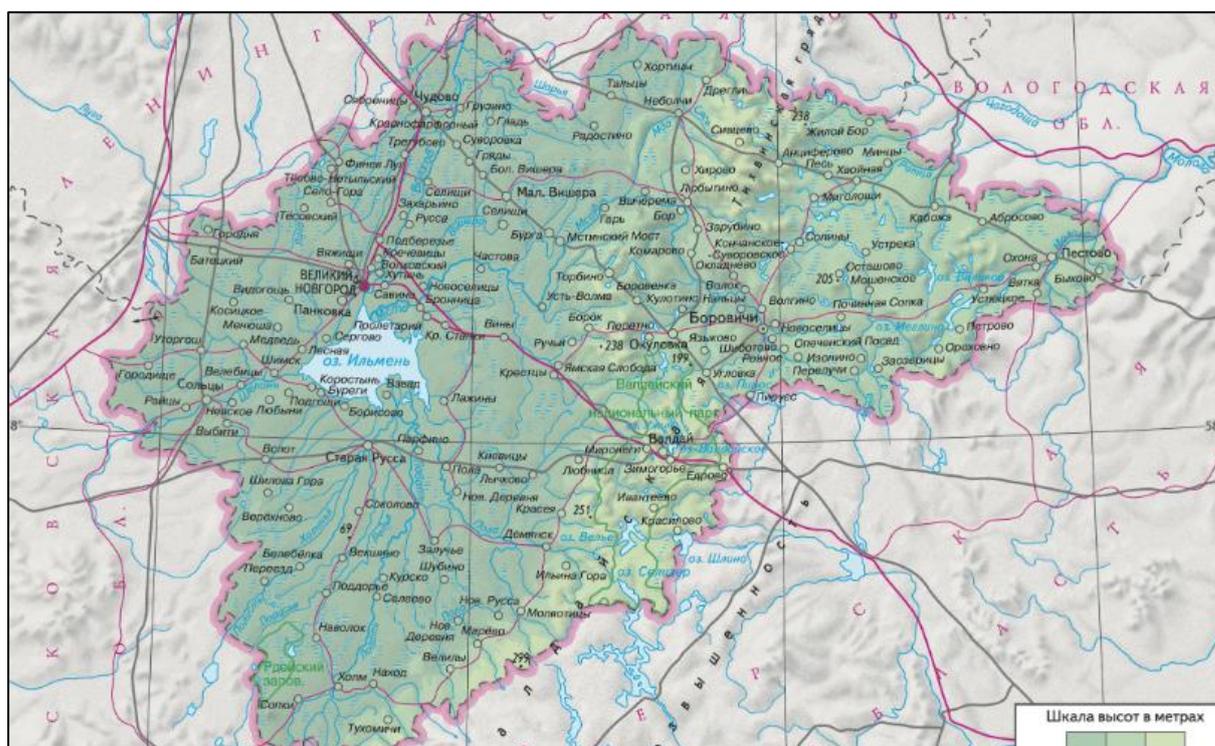


Рисунок 1.2 – Рельеф Новгородской области

1.4 Геологическое строение

Исследуемая территория относится к Прибалтийскому региону Русской платформы. На кристаллическом основании развита довольно мощная (600 м) осадочная толща верхнепротерозойских и палеозойских пород. Палеозойские осадки перекрываются четвертичными образованиями небольшой мощности. Осадочная толща сложена породами гдовского и котлинского горизонтов вендского комплекса верхнего протерозоя, ниже- и среднекембрийскими отложениями, образованиями всех трех отделов ордовика, средне- и верхнедевонскими осадками.

Четвертичные отложения представлены ледниковыми и озерно-ледниковыми отложениями осташковского горизонта валдайского надгоризонта верхнечетвертичного возраста, а также современными образованиями.

В геологическом строении участка исследований принимают участие (сверху-вниз):

- современные техногенные образования (tQ_{IV}), представленные насыпями автодорог и отвалами грунтов;
- современные биогенные образования (bQ_{IV}) представлены почвенно-растительным слоем;
- озерно-ледниковые отложения ($lgQ_{III} \text{ vd } kr+lž$) крестецко-лужских слоев осташковского горизонта валдайского надгоризонта верхнечетвертичного возраста;
- ледниковые отложения крестецко-лужских слоев осташковского горизонта валдайского надгоризонта верхнечетвертичного возраста ($gQ_{III} \text{ vdkr}+lž$);
- псковские слои староизборской свиты саргаевского горизонта верхнего девона ($D3ps$).

Озерно-ледниковые отложения распространены практически повсеместно, залегают на одновозрастных моренных отложениях, реже на девонских глинах, перекрыты современными образованиями. Грунты

представлены коричневыми, коричнево-серыми и серыми ленточными суглинками, супесями и песками различной крупности (от пылеватых до средней крупности). Ленточная структура суглинков определяется практически ритмичным чередованием прослоев суглинка и глины с песком пылеватым и мелким. Толщина прослоев изменяется от 1-3 мм до 3-5 см. Грунты содержат гравий и гальку в количестве от единичных включений до 5%;

Ледниковые отложения распространены практически повсеместно. Залегают на верхнедевонских отложениях. Представлены, в основном, коричнево-серыми твердыми и полутвердыми суглинками и супесями, которые содержат прослойки песков от мелких до гравелистых, гравийного и галечникового грунтов.

В нижней части моренной толщи встречаются глины, очень похожие по внешнему виду и свойствам на верхнедевонские суглинки, залегающие под мореной. Эти глины отнесены к моренным, поскольку (согласно полевому описанию на соседних площадках) отличаются от верхнедевонских суглинков включениями окатанных обломков (гравия и гальки) и отсутствием прослоев известняка и песчаника. Также в толще моренных суглинков и супесей встречаются останцы глины, она отнесена к моренным отложениям.

Моренные грунты содержат гравий и гальку изверженных пород, реже дресву и щебень известняка и песчаника, в количестве от 5 до 25%, валуны до 5-7%, в глинах, в основном, содержится дресва и щебень известняка и песчаника – до 20%.

Верхнедевонские отложения распространены повсеместно. В среднем, по району работ мощность верхнедевонских отложений составляет 18-20 м. При бурении скважин под КС Волховская II нитка СЕГ максимальная вскрытая мощность этих отложений составила 13,1 м. Кровля слоя была вскрыта буровыми скважинами на глубинах от 2,0 до 5,5 м.

Верхнедевонские отложения представлены глинами и суглинками красновато-коричневого цвета с голубовато-серыми пятнами и прослоями. Глины твердые, плотные, относятся к группе гидрослюдистых, высококарбонатных. Ниже глубин 6-7 м глины содержат прослои и линзы известняков и песчаников в количестве от 10 до 25%. Известняки преимущественно тонкозернистые, часто скрытокристаллические, зеленовато- и голубовато-серого цвета, сильно трещиноватые, малопрочные и средней прочности.

Суглинки по сути представляют собой глины с большим количеством песчаных прослоев. Суглинки твердые, тяжелые. Прослои известняков и песчаников, что были в глинах, в суглинках часто разрушены до дресвы и щебня.

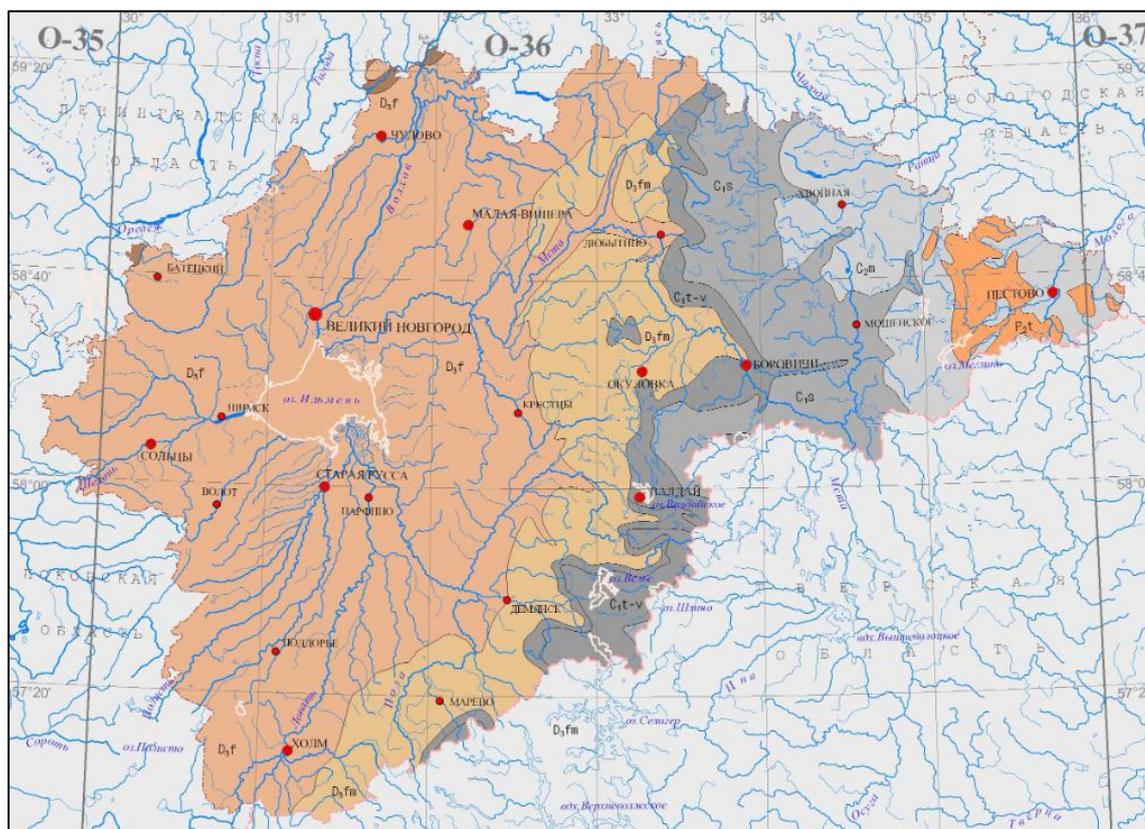


Рисунок 1.3 – Геологическая карта дочетвертичных отложений Новгородской области

1.5 Почвы и растительность

Участок проведения работ относится к Ловатско-Волховскому округу подзолистых почв подзоны южной тайги моренных и морено-ледниковых равнин (Прибалтийская провинция дерново-подзолистых слабогумусированных и болотно-подзолистых почв подзоны дерново-подзолистых почв южной тайги). На водоразделах рек и участках, окаймляющих территорию округа, встречаются двучленные наносы и моренные бескарбонатные отложения.

Равнинность рельефа и водно-физические свойства почвообразующих пород обуславливают значительную заболоченность платообразных водораздельных участков территории, где преимущественно развиты полугидроморфные и гидроморфные почвы. На дренированных платообразных возвышенностях на карбонатном основании развиваются наиболее ценные в сельскохозяйственном отношении подзолистые и дерново-подзолистые карбонатные почвы. Характерно развитие комплексов дерново-среднеподзолистых и дерново-сильноподзолистых, торфянисто-подзолисто-глеевых, дерново-подзолисто- глееватых и глеевых почв.

На песчаных озерно-ледниковых равнинах выделяются сочетания почв: на участках, расположенных выше уровня грунтовых вод, развиты комбинации дерново- слабоподзолистых и иллювиально-железистых почв с верховыми торфяниками, в понижениях рельефа с близким залеганием грунтовых вод формируются торфянисто- подзолисто-глеевые и торфяно-глеевые почвы.

В поймах на тяжелосуглинистом аллювии образуются аллювиальные почвы разной степени оглеенности, сочетающиеся с низинными торфяными почвами, приуроченными к старицам.

Растительность и флора Новгородской области хорошо изучена. В системе ботанико- географического районирования территория относится к Валдайско-Онежской подпровинции Североевропейской таежной провинции.

Лесные сообщества представлены темнохвойными (еловыми), светлохвойными (сосновыми) и смешанными лесами. Преобладающими древесными породами являются ель (*Picea abies*), берёза повислая (*Betula pendula*) и пушистая (*B. pubescens*), осина (*Populus tremula*), ольха чёрная (*Alnus glutinosa*) и серая (*Alnus incana*).

Болота занимают значимую часть земель. Наиболее распространёнными являются верховые и переходные болота с доминированием сфагновых мхов в наземном ярусе.

Травяные болота и черноольховые топи приурочены к понижениям рельефа, в первую очередь к выровненным поверхностям пойм.

Луга распространены в связи с длительным освоением. Луговые сообщества значительно обогащают флору региона, так как на них произрастают виды, изначально не свойственные исследуемой территории.

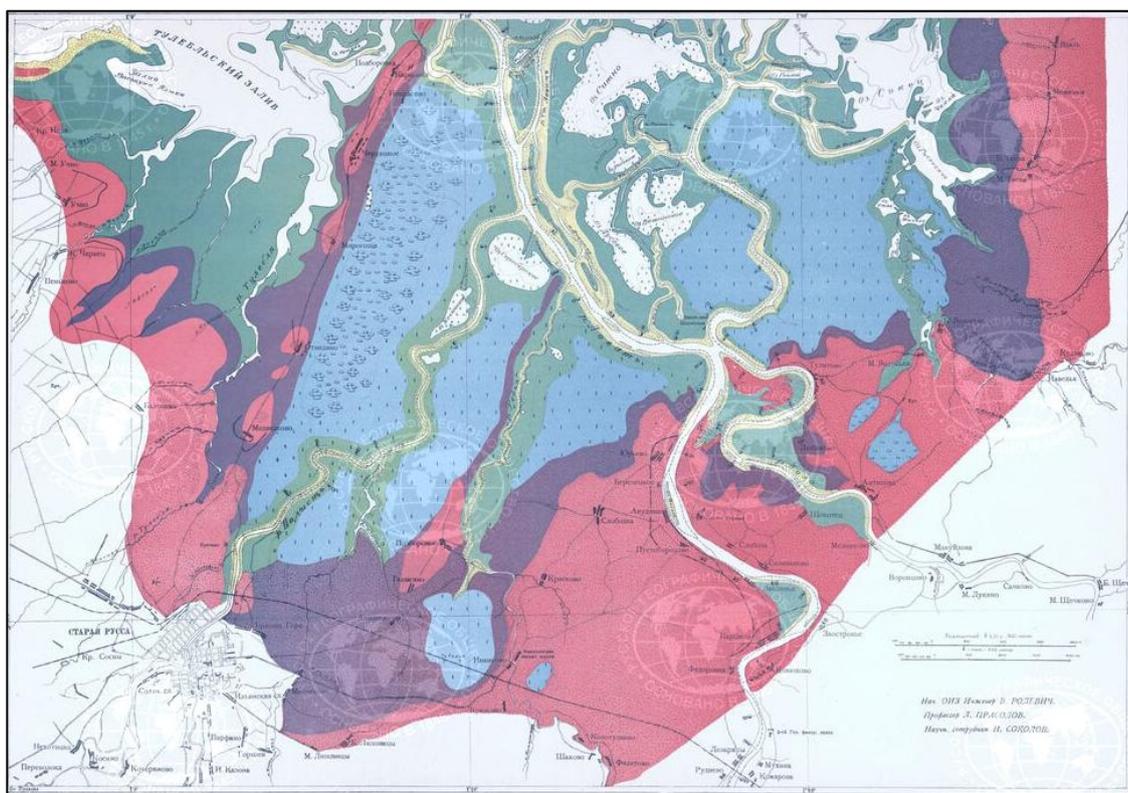


Рисунок 1.4 – Почвенная карта поймы озера Ильмень

1.6 Гидрографическая характеристика бассейна озера Ильмень

Речная сеть района относится к бассейну Балтийского моря. Густота гидрографической сети Волховско-Ильменского бассейна составляет 0,75

км/км². Большинство рек этого бассейна берет свое начало из водораздельных болот. В верхнем течении долины их не выражены или слабо выражены; русла разработаны слабо, реки часто теряются в зарослях кустарника и болотной растительности; уклоны очень малы. В пределах холмисто-озерной моренной полосы, опоясывающей дугой верхнюю часть Волховского бассейна, речные системы состоят из цепи озер, соединенных короткими протоками.

Многие реки на устьевом участке разветвляются на многочисленные рукава, образуя обширные дельты (реки Мста, Пола, Ловать).



Рисунок 1.5 – Водосбор озера Ильмень

Реки исследуемого района относятся к восточно-европейскому типу внутригодового распределения стока, который характеризуется высоким половодьем, низкой летней и зимней меженью и повышенным стоком в осенний период. В среднем в период весеннего половодья на малых реках проходит 60-70% годового стока, в летне-осеннюю межень – 20%, в зимнюю

– 6-8%. Доля весеннего стока в многоводные годы уменьшается до 55% и возрастает до 80% в очень маловодные. Одновременно возрастает или снижается роль летне-осенней и зимней межени. Годовой ход уровня на пересекаемых реках отличается в основном сроками прохождения, интенсивностью и высотой весеннего половодья и дождевых паводков.

Реки рассматриваемой территории имеют смешанное питание с преобладанием снегового: половину годового стока дают талые снеговые, другую половину - дожди и грунтовые воды (снеговые – 50-60%, дождевые – 20-30%, грунтовые – 10-20%). На реках наблюдаются сезонные колебания уровня.

В годовом ходе уровня воды четко выражены четыре фазы: весеннее половодье, летне-осенняя межень, почти ежегодно нарушаемая дождевыми паводками, затем короткий осенне-зимний период с несколько повышенной водностью реки, наконец, устанавливается зимняя межень, в некоторые годы прерываемая подъемами уровня воды в периоды оттепелей.

Весеннее повышение уровней начинается, как правило, в последних числах марта – первых числах апреля. Пик половодья отмечается в среднем 17-21 апреля. Высота подъема весеннего половодья на малых реках в среднем составляет 2,0-2,5 м. Окончание половодья на малых водотоках наблюдается обычно во второй половине мая. Таким образом, продолжительность половодья составляет в среднем 40-60 дней.

Летне-осенняя межень наступает обычно в июне и заканчивается в сентябре. Низшие уровни этого периода наблюдаются в июле – августе. Почти ежегодно межень нарушается дождевыми паводками. Осенние паводки обусловлены продолжительными обложными дождями. На реках с малыми водосборами осенние паводки в отдельные годы могут превышать максимальные расходы весеннего половодья

Зимняя межень устанавливается обычно в конце ноября – начале декабря, а заканчивается в марте. В течение межени уровни постепенно снижаются и достигают минимума в марте, перед началом снеготаяния.

Реки являются главным источником поступления воды в озеро, который составляет более 90 % всего прихода воды в этот водоём. Средние многолетние модули стока крупнейших рек бассейна Ильменя составляют: Мета – 9,0 л/с км², Ловать – 7,7 л/с км², Шелонь – 6,4 л/с км², Пола – 8,8 л/с км². Средний по бассейну модуль стока – 7,5 л/с км². Этот показатель водности заметно меньше, чем в других частях бассейна Ладожского озера. Тем не менее, вытекающая из озера река Волхов сбрасывает в Ладогу около 18 км³ воды, что составляет более четверти общего притока воды в это озеро.

Более половины стока рек бассейна Ильменя приходится на весну – 57%, осень – 18 %, зиму – 17%, лето – 8 %. Заметно меняется количество притекающей воды в разные по водности фазы, продолжительность которых 13-15 лет. Например, в многоводную фазу 1922-1936 гг. модульный коэффициент равнялся 1,2, а в маловодную – 1963-1977 гг. – 0,79. Если принять средний многолетний приток воды в озеро равный 14,5 км³, а объём озера 3 км³, то коэффициент внешнего водообмена составит 4,8, т.е. в среднем вода в озере меняется около 5 раз в год. Такой высокий коэффициент внешнего водообмена предопределяет относительно невысокую инерционность в колебаниях уровня озера (коэффициент автокорреляции 0,4) и увеличивает вклад случайной составляющей в общую дисперсию колебаний. Поэтому водный режим вытекающей из озера реки Волхов заметно отличается от режима колебаний уровня Ладоги и стока реки Невы.

Амплитуда колебаний годовых уровней озера за многолетний период составила почти 3 м, а внутригодовая амплитуда превысила 7 м. Абсолютный максимум наблюдался в 1922 г. и равнялся 22,91 м. абс., а абсолютный минимум – в 1882 г. – 15,51 м. абс. При уровнях, превышающих 21,8 м. абс. происходит затопление населённых пунктов, расположенных в прибрежной зоне озера.

Озеро и его бассейн широко используются в хозяйственных целях. Озеро представляет собой высокопродуктивный водоём. Современное

состояние ихтиофауны озера позволяет вылавливать до 30 тыс. центнеров рыбы в год, представленной 26 видами. В среднем 8,4 % площади озера занято макрофитами, эта площадь меняется при разном наполнении водоёма.

Высота и продолжительность стояния уровня, прежде всего внутри года, в разные сезоны. Режим этих колебаний оказывает большое влияние на все стороны жизни озера, состояние его экосистемы, продуктивность заливаемых лугов, высоту стояния уровня грунтовых вод и т.п. Режим стока Волхова полностью определяется уровнем режимом и предопределяет планирование работы ГЭС. При этом в отдельные годы подпор от водохранилища Волховской ГЭС достигает озера.

2. ОЦЕНКА ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ВОДНОСТЬ ПАРАМЕТРОВ

Для оценки водности озера Ильмень необходимо определить параметр, по которому будет оцениваться данная характеристика, а также влияющие факторы, под воздействием которых параметр оценки меняется во временном промежутке.

Поскольку исследуемым водным объектом является озеро – параметром оценки водности будет являться уровень воды. Для определения влияющих факторов необходимо составить водный баланс озера, для определения приходных и расходных характеристик, а также для анализа их влияния на определяющий водность параметр.

Водный баланс, определяемый процессами прихода и расхода воды, формирующейся разными источниками, применительно к озерам, представляет собой частный случай фундаментального закона естествознания — закона сохранения материи (массы). Этот баланс является ключевым аспектом гидрометеорологического состояния водоемов и служит основой для оценки как текущего, так и потенциального состояния водных ресурсов озер и водохранилищ. Изучение водного баланса позволяет анализировать физические и химические процессы внутри водоемов, а также оценить воздействие хозяйственной деятельности на водные ресурсы. Водный баланс – отражение совокупности всех факторов, влияющих на изменение запасов в озере или водохранилище.

Для вычисления водного баланса озера Ильмень необходимо принять условный расчетный год, на основании которого будут оцениваться влияющие факторы.

Для того, чтобы определить расчетный год, необходимо провести многолетний анализ водности озера Ильмень. Для определения данной характеристики в настоящей работе применяется квантильный анализ.

2.1 Многолетний анализ водности озера Ильмень при использовании квантильного метода

Квантильный анализ заключается в нахождении квантилей $Q_{min}, Q_{0.25}, Q_{0.5}, Q_{0.75}, Q_{max}$ функции распределения $F(x)$ данных в выборке. Алгоритм оценивания перечисленных характеристик следующий: Q_{min} и Q_{max} – минимальное и максимальное значения данных в выборке, $Q_{0.5}$ – медиана. Если количества членов в выборке нечетное, то медиана – центральное значение выборки, если количество членов в выборке четное, то медиана – среднее между двумя центральными значениями. $Q_{0.25}$ и $Q_{0.75}$, – характеризуют центр первой и второй половины выборки, соответственно.

Наряду с перечисленными квантилями использовались их линейные комбинации:

размах в пределах выборки

$$R = Q_{max} - Q_{min} \quad (1)$$

интерквантильное расстояние

$$Q = Q_{0.75} - Q_{0.25} \quad (2)$$

Для $Q_{0.25}$ и $Q_{0.75}$, – вводятся барьерные значения, Q_v – верхний барьер и Q_n – нижний барьер:

$$Q_v = Q_{0.75} + 1.5Q \quad (3)$$

$$Q_n = Q_{0.25} - 1.5Q \quad (4)$$

Для расчета используется ряд среднегодовых уровней озера Ильмень в створе измерений д. Войцы, приведенный в **Приложении 1**.

Таблица 2.1.1 — Статистические характеристики многолетней изменчивости

Квантиль	Уровень, см
$X_{0,5}$	322
$X_{0,75}$	376
$X_{0,25}$	268
X_H	30
X_B	538
\bar{x}	108

Квантильная диаграмма среднегодовых уровней озера Ильмень представлена на рисунке 2.1.1.

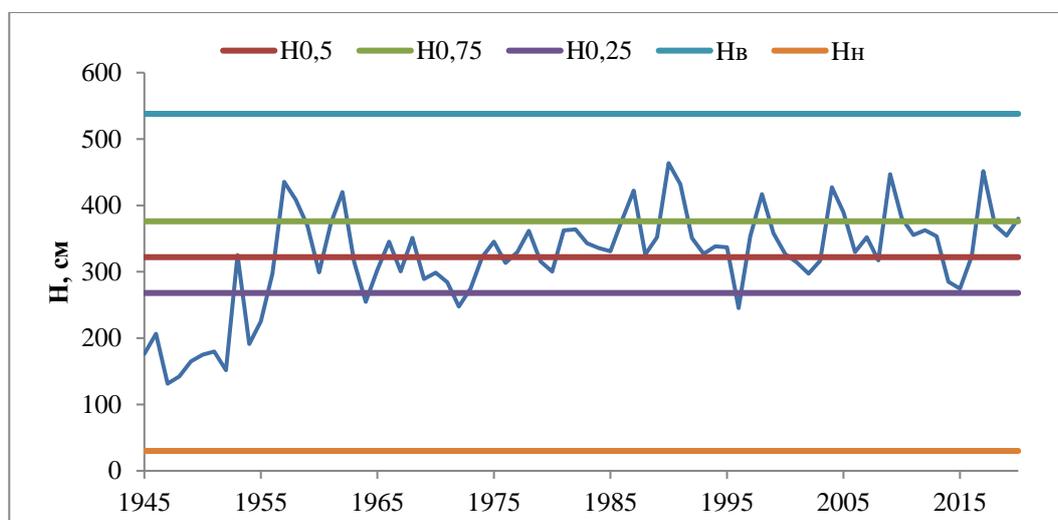


Рисунок 2.1.1 – Квантильная диаграмма среднегодовых уровней воды оз. Ильмень – д. Войцы

Таблица 2.1.2 — Результаты квантильного анализа среднегодовых уровней воды оз. Ильмень (высокоуровенные годы)

Высокоуровенные годы
Ильмень (1945-2023) $538 < H < 376$ см
1957-1958
1962
1986-1987
1990-1991
1998
2004-2005
2009-2010
2017-2018
2020

Таблица 2.1.3 — Результаты квантильного анализа среднегодовых уровней воды оз. Ильмень (низкоуровенные годы)

Низкоуровенные годы
Ильмень (1945-2023) $30 < H < 268$ см
1945-1952
1954-1955
1964
1972

Для озера Ильмень, низкоуровенными и высокоуровенными годами считаются те годы, значения которых выходят за квантили $H_{0.25}$ и $H_{0.75}$ соответственно. Среднеуровенными годами можно считать те года, значения которых находятся на квантиле $H_{0.5}$.

Таблица 2.1.4 — Результаты квантильного анализа среднегодовых уровней воды оз. Ильмень (среднеуровенные годы)

Среднеуровенные годы
Ильмень (1945-2023) $H=322$ см
1974
1999
2011

Одним из таких годов является 2011 год, принимаемый расчетным в дальнейшем расчете водного баланса.

2.2 Водный баланс озера Ильмень за расчетный год средней водности

Водный баланс — одна из главнейших характеристик гидрометеорологического режима озер и водохранилищ. На его основе изучается водообмен, химические и физические процессы на водоеме. Так же водный баланс необходим для оценки хозяйственных мероприятий, проводимых на водоемах с использованием их водных ресурсов.

Водный баланс озера определяется расходными и приходными характеристиками. Уравнение баланса в общем виде можно представить так:

$$\sum \text{П} - \sum \text{Р} = \sum \text{А} + \text{Н} \quad (5)$$

Где $\sum\Pi$ – сумма приходных составляющих, $\sum P$ – сумма расходных составляющих, $\sum A$ – аккумуляция на водоеме, H' – невязка баланса.

Приходные компоненты баланса: P_p – приток воды по рекам, впадающих в водоем и с площади, непосредственно прилегающей к водоему и не имеющий постоянной гидрографической сети; $P_{\text{п}}$ – приток подземных вод; $P_{\text{ос}}$ – поступление воды за счет осадков, выпавших на зеркало водоема; L – приток воды за счет таяния льда на берегах; K – конденсация влаги на поверхность водоема. Формула для подсчета приходных составляющих выглядит следующим образом:

$$\sum \Pi = P_p + P_{\text{п}} + P_{\text{ос}} + L + K \quad (6)$$

Для расчета приходных составляющих для озера Ильмень за 2011 год учитывались только приток по рекам (P_p) и поступление воды за счет осадков ($P_{\text{ос}}$). Поэтому формула будет выглядеть так:

$$\sum \Pi = P_p + P_{\text{ос}} \quad (7)$$

Расходные компоненты баланса: C – сток воды из озера по вытекающим из него рекам; I – потери на испарение с водного зеркала; Φ – фильтрация воды из водоема в подземные воды; L_1 – временные потери воды за счет оседания льда и покрывающего его снега на берегах при зимнем снижении уровня водоема; Z – расход воды на хозяйственные нужды. Сумма расходных составляющих выглядит так:

$$\sum P = C + I + \Phi + L_1 + Z \quad (8)$$

Для расчета расходных составляющих для озера Ильмень за 2011 год учитывались только сток воды из озера (C) и испарение с водной поверхности озера (I). Формула для расчета расходных компонентов преобразуется:

$$\sum P = C + I \quad (9)$$

Аккумуляционные компоненты и невязка: A_v – аккумуляция воды в чаше водоема; A_b – аккумуляция воды в грунтах берегов; $A_{\text{п}}$ – аккумуляция в русле и пойме устьевой части, впадающих в озеро. H' – невязка баланса,

складывающаяся из суммы неучтенных составляющих суммарной ошибки определения учтенных:

$$H' = \sum P - \sum R \quad (10)$$

В качестве аккумуляционной составляющей учитывалась только аккумуляция воды в чаше водоема.

В зависимости от задач водный баланс может быть рассчитан за любой промежуток времени (месяц, год, десятилетие). В нашем случае водный баланс рассчитывался за год, а все его элементы выражались в объемных характеристиках:

$$W_{пр} + W_{ос} - W_{исп} - W_{ст} = \pm W_{ак} \quad (11)$$

2.2.1 Определение приходных составляющих

Поверхностный приток. Систематические наблюдения ведутся не на всех реках. Освещенная наблюдениями площадь водосбора – $F_{осв}$, неосвещенная – $F_{неосв}$. Для освещенной территории приток равен сумме расходов рек на гидропостах, расположенных как можно ближе к устью. Если гидропост находится далеко от устья, и ниже по течению есть притоки, то следует так же учитывать расход на этих притоках.

Таблица 2.2.1.1 — Данные по рекам для расчета приходной составляющей

Номер поста	Река	Пост	Средний расход $Q_i, \text{ м}^3/\text{с}$	Площадь водосбора, $F_i, \text{ км}^2$
72281	р. Мста	д. Девкино	220	22500
72423	р. Пола	д. Налючи	84.3	6450
72502	р. Тулебля	г. Старая Русса	0.45	52
72504	р. Перехода	д. Подсосонье	0.74	dd95.1
72508	р. Шелонь	г. Порхов	19.5	2950
72518	р. Уза	д. Дубская	2.42	515
72519	р. Ситня	д. Пески	7.36	906
72523	р. Мшага	д. Раглицы	10.9	1250
72459	р. Ловать	г. Холм	109	1470

Номер поста	Река	Пост	Средний расход $Q_i, \text{ м}^3/\text{с}$	Площадь водосбора, $F_i, \text{ км}^2$
72745	р. Заробская Робья	д. Пинаевы горки	4.39	552
72752	р. Редья	д. Давыдово	3.4	542
72760	р. Полисть	д. Утушкино	9.54	1450
Σ			472	38732

Суммарный расход по рекам и освещенная наблюдениями площадь водосбора равны:

$$Q_{\text{осв}} = \sum_{i=1}^n Q_i = 472 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

$$F_{\text{осв}} = \sum_{i=1}^n F_i = 38732 \text{ км}^2$$

Приток с неосвещенной территории рассчитывается по формулам:

$$Q_{\text{неосв}} = q_{\text{ср.взв}} \cdot F_{\text{неосв}} \quad (12)$$

где $q_{\text{ср.взв}}$ – средневзвешенный модуль стока.

$$q_{\text{ср.взв}} = \frac{\sum F_i q_i}{\sum F_i} \quad (13)$$

$$q_i = \frac{Q_i}{F_i} \quad (14)$$

$$q_{\text{ср.взв}} = 12,186 \frac{\text{л}}{(\text{с} \cdot \text{км}^2)}$$

$$F_{\text{неосв}} = F_{\text{водосбора}} - F_{\text{осв}} = 28468 \text{ км}^2$$

Площадь водосбора озера Ильмень определена в соответствии с «Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов» (АИС ГМВО).

Приток воды с неосвещенной территории равен:

$$Q_{\text{неосв}} = q_{\text{ср.взв}} \cdot F_{\text{неосв}} = \frac{12,186 \cdot 28468}{1000} = 346,92 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Объем притока в озеро Ильмень с освещенной территории равен:

$$W_{\text{осв}} = Q_{\text{осв}} T = \frac{472 \cdot 31536000}{10^9} = 14,88 \text{ км}^3$$

С неосвещенной:

$$W_{\text{неосв}} = Q_{\text{неосв}} T = \frac{346,92 \cdot 31536000}{10^9} = 10,94 \text{ км}^3$$

Общий объем притока составляет:

$$W_{\text{пр}} = W_{\text{осв}} + W_{\text{неосв}} = 25,82 \text{ км}^3$$

Осадки. Поступление воды за счет осадков, выпавших на зеркало водоема, определяется по наблюдениям островных береговых дождемерных пунктов. При этом в показания осадкомеров вводятся поправки в соответствующими методическими указаниями. Средний по водоему слой осадков определяется путем подсчета среднего арифметического или средневзвешенного значения.

Первый прием целесообразно применять, когда дождемерные пункты размещены по территории равномерно, их достаточное количество и осадки по площади изменяются незначительно.

Объем осадков, поступающих на зеркало водоема, подсчитывается для его средней площади и за рассматриваемый интервал.

Для подсчета водного баланса для озера Ильмень были выбраны станции Старая Русса, Тихвин, Белогорка и Бологое. Все метеорологические данные определены в соответствии с «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных» и представлены в таблице 2.2.1.2:

Таблица 2.2.1.2 — Суммы осадков на метеостанциях, мм

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Σ
Старая Русса	69,1	31,1	18,8	14,7	47,3	40,6	80,2	123,4	99,1	59,7	32,7	56,7	673,4
Бологое	69,7	31,1	24,3	16,4	47,1	57,5	107,2	60	125,8	48,1	40,9	99,4	727,5
Тихвин	65,2	30	43,6	17,4	88,5	137,2	80,2	117	100,1	63,8	59,7	85,9	888,6
Белогорка	51,6	37,4	25,3	56,5	87,3	65,9	74,2	116,4	71,8	44,3	38,1	60,1	728,9

В данной работе средний по водоему слой осадков был определен путем подсчета среднего арифметического:

$$P = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{n} = 754,6 \text{ мм} = 0,0007546 \text{ км}$$

Где P_1, P_2, P_3, P_4 – годовые суммы осадков на каждой метеостанции.

Объем воды за счет осадков подсчитывается для зеркала озера, так как осадки, выпавшие на территорию водосбора, учитываются в объеме притока с неосвещенной территории. Площадь зеркала озера взята из «Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод и суши» и равна 1090 км².

$$W_{\text{ос}} = PF_{\text{зер}} = 0,823 \text{ км}^3$$

2.2.2 Определение расходных составляющих

Сток воды из озера. Сток воды определяется по данным измерения расхода воды на гидростворе. При этом гидроствор должен находиться вблизи истока реки. Для озера Ильмень главная составляющая расходных компонентов - река Волхов. Однако, в истоке реки Волхов измерения расхода воды не производятся. По этой причине расход воды был взят с ближайшего гидропоста – на нижнем бьефе Волховской ГЭС. Для того, чтобы расчет расходных составляющих был наиболее правильным, необходимо учитывать весь объем воды, попадающий в р. Волхов до гидропоста на Волховской ГЭС. Этот объем воды приносят в Волхов реки Кересть, Пчевжа и Тигода. Данные по расходам рек и их водосборам представлены в таблице 2.2.2.1.

Таблица 2.2.2.1 — Данные по рекам для расчета расходной составляющей

Номер поста	Река	Пост	Средний расход $Q_i, \text{ м}^3/\text{с}$	Площадь водосбора, $F_i, \text{ км}^2$
72213	р. Волхов	нижний бьеф, ГЭС	651	19800
72227	р. Кересть	д. Сябраницы	7,39	833
72239	р. Пчевжа	д. Белая	20	1690

Номер поста	Река	Пост	Средний расход $Q_i, \text{ м}^3/\text{с}$	Площадь водосбора, $F_i, \text{ км}^2$
72246	р. Тигода	ст. Любань	5,9	589

Сток воды из озера равен:

$$Q_{\text{ст}} = Q_{\text{волх}} - \sum Q_{\text{пр}} = 617,71 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Где $Q_{\text{волх}}$ – данные расхода р. Волхов с нижнего бьефа ГЭС, $\sum Q_{\text{пр}}$ – сумма расходов притоков.

Таким образом, объем стока равен:

$$W_{\text{ст}} = Q_{\text{ст}} T = \frac{617,71 \cdot 31536000}{10^9} = 19,5 \text{ км}^3$$

Испарение с поверхности озера. Испарение с поверхности озера рассчитывается отдельно для периода, свободного ото льда и холодного времени года:

$$E_{\text{год}} = E_{\text{т}} + E_{\text{х}} \quad (15)$$

Для расчета испарения за период, свободного от ледяного покрова, используется формула ГГИ:

$$E_{\text{т}} = 0.14n(e_0 - e_2)(1 + 0,72V_2) \quad (16)$$

Где $E_{\text{т}}$ – месячная сумма испарения за теплый период, мм; n – число дней за расчетный временной интервал, e_0 – среднее значения максимальной упругости водяного пара, вычисленное по температуре поверхности воды в водоеме, мбар; e_2 – среднее значение упругости водяного пара над водоемом на высоте 2 м, мбар; V_2 – скорость ветра на высоте 2 м над поверхностью воды, м/с.

Скорость ветра на высоте 2 метров рассчитывается за каждый месяц для каждой метеостанции по формуле:

$$V_2 = V_{\phi} K_1 K_2 K_3 \quad (17)$$

Где V_{ϕ} – скорость ветра на метеостанции на высоте флюгера, K_1 – коэффициент, учитывающий степень защищенности метеостанции на суше; K_2 – коэффициент, учитывающий характер рельефа; K_3 – коэффициент, учитывающий среднюю длину разгона воздушного потока над водоемом ($L_{\text{разг}}$).

Для коэффициентов K_1 и K_2 было использовано описание метеостанций и окрестностей из справочных материалов, а именно: «Справочник по климату СССР, История и физико-географическое описание метеорологических станций и постов».

Таблица 2.2.2.2 — Описание метеостанций и коэффициенты K_1 , K_2

Станция	Описание	K_1	K_2
Старая Русса	Метеостанция расположена в низине, в 15 км от оз. Ильмень. Ровная местность, частично заболоченная, занята лугами и полями. Флюгер находится на открытой местности, высота флюгера 12.3 м, ближайших строений нет.	1	1,1
Бологое	Метеостанция расположена на северо-западной окраине города. Ближайшее построение в 150 м (10 м в высоту) Флюгер расположен на ровном участке, высота флюгера 10.9 м. Растительность луговая	1	1,1
Белогорка	Метеостанция расположена на плато. Местность ровная, занята пахотными землями и лесными массивами. Высота флюгера – 19.5 м. В 7 м от станции находится фруктовый сад с невысокими деревьями.	1,3	1,1

Для коэффициента K_3 необходимо рассчитать среднюю длину разгона воздушного потока над водной поверхностью, в соответствии со следующей формулой:

$$L_{\text{разг}} = 0,01(L_{\text{С-Ю}}(N_{\text{С}} + N_{\text{Ю}}) + L_{\text{З-В}}(N_{\text{З}} + N_{\text{В}}) + L_{\text{СЗ-ЮВ}}(N_{\text{СЗ}} + N_{\text{ЮВ}}) + L_{\text{СВ-ЮВ}}(N_{\text{СВ}} + N_{\text{ЮВ}})) \quad (18)$$

Где $L_{\text{С-Ю}}$, $L_{\text{З-В}}$ и т.д. – средняя длина разгона воздушного потока по профилям соответствующих направлений, км, $(N_{\text{С}}+N_{\text{Ю}})$, $(N_{\text{З}}+N_{\text{В}})$ и т.д. –

сумма повторяемостей направления ветра для двух взаимно противоположных румбов, %.

Для расчета средней длины разгона воздушного потока по профилям направлений необходимо выполнить дополнительные построения: на карте озера было нанесено две сетки в направлениях Север–Юг, Запад–Восток, Северо–Запад, Северо–Восток, Юго–Запад, Юго–Восток с шагом в 5 км. По этим сеткам измерена ширина. Средняя длина разгона воздушного потока рассчитана способом среднего арифметического и равна 24,66 км. Дополнительные построения представлены на 2.2.2.1.

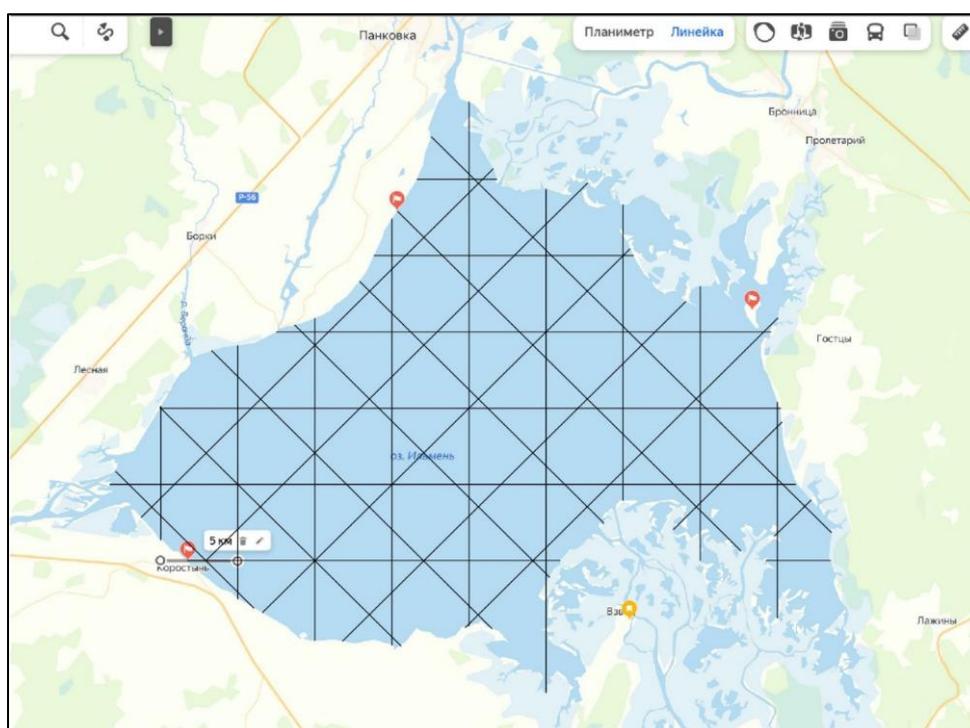


Рисунок 2.2.2.1 — Сетки в направлениях Север–Юг, Запад–Восток, Северо–Восток, Северо–Запад, Юго–Восток, Юго–Запад

Таким образом, K_3 для всех метеостанций равен 1.

Расчет скорости ветра представлен в таблице 2.2.2.3.

Таблица 2.2.2.3 — Расчет скорости ветра над водной поверхностью на высоте 2 м

Средняя скорость ветра на высоте флюгера, м/с							Коэффициенты			Средняя скорость ветра на высоте 2 метров, м/с					
	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	K1	K2	K3	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
Старая Русса	2,50	1,94	1,61	1,72	2,10	2,55	1	1,1	1	2,75	2,14	1,77	1,89	2,31	2,81
Бологое	2,31	1,89	1,85	1,77	2,05	2,38	1	1,1	1	2,55	2,08	2,04	1,94	2,26	2,62
Белогорка	2,92	2,45	1,96	2,14	2,52	3,21	1,3	1,1	1	4,17	3,50	2,81	3,06	3,60	4,58
Среднее, м/с										2,85	2,34	2,01	2,15	2,47	3,03

Средняя по акватории абсолютная влажность воздуха рассчитывается по формуле:

$$e_2 = e_2' + (0.8e_0 - e_2')M \quad (19)$$

Где e_2' — упругость водяного пара на метеостанции, M – коэффициент, зависящий от длины разгона воздушного потока над поверхностью воды и разницы температур между водой и воздухом, температура воды измеряется на гидропостах на озере. Для оз. Ильмень это посты: Войцы, Коростынь, Козынево. Расчетный коэффициент M , а так же результаты расчетов средней влажности и испарения за теплый период показаны в таблицах 2.2.2.4-2.2.2.6.

Таблица 2.2.2.3— Коэффициент M

Пост	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
Войцы	0,36	0,46	0,46	0,46	0,36	0,36
Козынево	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36

Пост	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
Коростынь	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36

Таблица 2.2.2.5 — Расчет средней по акватории абсолютной влажности воздуха e_2

Станция	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
Старая Русса	-6,34	-14,22	-27,12	-16,64	-10,35	-5,17
Бологое	-6,46	-22,35	-39,41	-27,89	-14,13	-6,74
Белогорка	-5,70	-11,23	-22,03	-11,54	-6,75	-3,76

Таблица 2.2.2.6 — Расчет испарения с озера Ильмень за теплый период E_T , мм

	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	Σ
Старая Русса	203,04	304,84	460,67	327,26	250,97	179,05	1725,82
Бологое	192,30	380,44	623,30	443,09	284,06	186,63	2109,82
Белогорка	261,15	381,21	543,09	377,63	290,00	231,43	2084,51
Среднее испарение, мм							1973,38

Для расчета испарения за холодный период используют формулы:

Формула Кузьмина:)

$$E_x = 0,37nd_2 \quad (20)$$

Формула Константинова:

$$E_x = \left(0,018 \cdot \frac{(T_n - Q_2)}{U_{10}} + 0,1 \cdot U_{10} \right) (e_{0\text{сн}} - e_2) \quad (21)$$

Формула Постникова:

$$E_x = 0.31nd_2 \quad (22)$$

Для расчета испарения за холодный период с оз. Ильмень была использована формула Константинова, в которой d_2 – дефицит влажности воздуха. Результаты представлены в таблице 2.2.2.7:

Таблица 2.2.2.7 — Расчет испарения с озера Ильмень за холодный период, E_x , мм

	январь	февраль	март	апрель	ноябрь	декабрь	
Старая Русса	5,39	5,51	16,25	44,23	9,52	10,40	Σ
Бологое	4,32	4,59	16,73	42,81	7,02	7,61	
Тихвин	4,11	3,65	15,04	39,47	7,52	7,08	
Белогорка	1,68	1,80	11,81	33,60	6,86	5,98	
Среднее	3,87	3,89	14,96	40,03	7,73	7,77	

Общее испарение за год составляет:

$$E_{\text{год}} = E_T + E_x = 1973,38 + 78,24 = 2051,63 \text{ мм} = 0,00205 \text{ км}$$

Объем воды, испарившейся с водной поверхности, составляет:

$$W_{\text{исп}} = E_{\text{год}} F_{\text{зер}} = 2,24 \text{ км}^3$$

2.2.3 Определение аккумуляционных составляющих и невязки

Аккумуляция воды. Аккумуляция определяется как разность объемов озера на начальный и конечный моменты расчетного интервала (ΔW). Для этого необходимо взять измерения уровней воды на постах. На оз. Ильмень

находятся посты: Войцы, Коростынь, Козынево. Уровни воды на постах представлены в **Приложении**.

Так как посты на озере расположены неравномерно, нельзя воспользоваться формулой среднего арифметического для расчета среднего изменения уровня воды.

По этой причине была использована формула для определения средневзвешенного уровня воды:

$$\Delta H = \frac{\Delta H_1 f_1 + \Delta H_2 f_2 + \Delta H_3 f_3}{f_1 + f_2 + f_3} \quad (23)$$

Где ΔH_1 , ΔH_2 , ΔH_3 – изменения уровня воды на постах, f_1 , f_2 , f_3 – площади, которые покрывают эти посты.

Площади были вычислены при помощи метода полигонов (Рис. 2.2.3.1 – 2.2.3.2).



Рисунок 2.2.3.1 — Определение площади методом полигонов для поста Коростынь

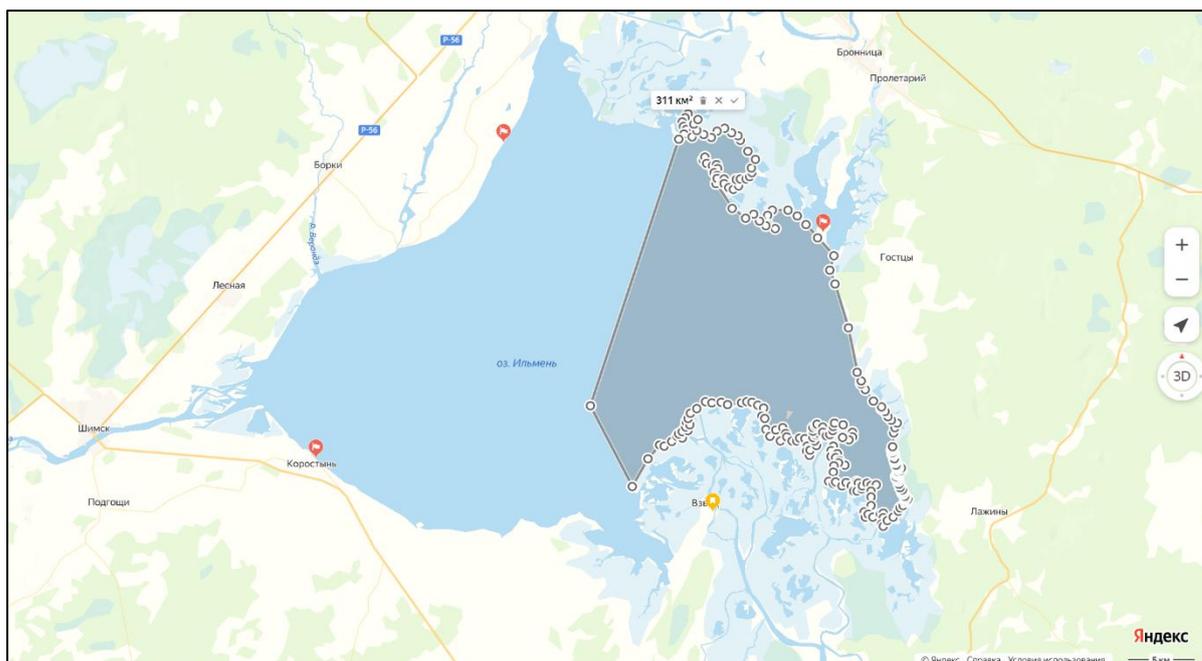


Рисунок 2.2.3.2 — Определение площади методом полигонов для поста Войцы

Изменение уровня воды за год вычисляется по формуле:

$$\Delta H = H_{31.12} - H_{01.01} \quad (24)$$

Где $H_{31.12}$, $H_{01.01}$ – уровни воды на последнее и первое число года соответственно.

Данные по постам представлены в таблице 2.2.3.1.

Таблица 2.2.3.1 — Изменения уровня воды на постах и относящиеся к ним площадь

Пост	Площадь, км ²	Площадь, %	ΔH , см	ΔH , км
Войцы	311	28,5	54	0,00054
Коростынь	327	30	55	0,00055
Козынево	452	41,5	55	0,00055

$$\Delta H = \frac{\Delta H_1 f_1 + \Delta H_2 f_2 + \Delta H_3 f_3}{f_1 + f_2 + f_3} = 0,000547 \text{ км}$$

Объем аккумуляции составил:

$$W_{\text{акк}} = \Delta H F_{\text{зер}} = 0,597 \text{ км}^3$$

Так как аккумуляция оказалась положительной, это означает, что объем воды в чаше озера увеличился. Значит, аккумуляция относится к приходным характеристикам.

Невязка. Невязка складывается из различных ошибок при измерениях, вычислениях. Она рассчитывается по формуле:

$$H' = \sum П - \sum P \pm A \quad (25)$$

Таблица 2.2.3.2 — Элементы баланса

Приходные характеристики		Расходные характеристики	
Элемент баланса	W, км ³	Элемент баланса	W, км ³
осадки	0,82	испарение	2,4
приток	25,83	сток	19,48
аккумуляция	0,60		
Σ	27,24	Σ	21,72

Таким образом невязка равна:

$$H' = \sum П - \sum P \pm A = 5,5 \text{ км}^3$$

2.2.4 Сведение водного баланса

Таблица 2.2.4.1 — Процентное соотношение элементов баланса

Приходные компоненты			Расходные компоненты		
Элемент баланса	W, км ³	%	Элемент баланса	W, км ³	%
осадки	0,82	3,02	испарение	2,24	10,30
приток	25,83	94,79	сток	19,48	89,70
аккумуляция	0,60	2,19			
Σ	27,24	100	Σ	21,72	100

Для сведения водного баланса нужно пропорционально распределить невязку по тем элементам, сумма которых меньше:

$$\Delta H'_1 = \frac{H' \cdot \%_{\text{исп}}}{100\%} = 0,57 \text{ км}^3$$

$$\Delta H'_2 = \frac{H' \cdot \%_{\text{сток}}}{100\%} = 4,96 \text{ км}^3$$

$$W_{\text{исп св.}} = W_{\text{исп}} + \Delta H'_1 = 2,8 \text{ км}^3$$

$$W_{\text{сток св.}} = W_{\text{сток}} + \Delta H'_2 = 24,4 \text{ км}^3$$

Таблица 2.2.4.2 — Сведение водного баланса

Приходные компоненты			Расходные компоненты		
Элемент баланса	W, км ³	%	Элемент баланса	W, км ³	%
осадки	0,82	3,02	испарение	2,8	10,30
приток	25,83	94,79	сток	24,4	89,70
аккумуляция	0,60	2,19			
Σ	27,24	100	Σ	27,24	100

Благодаря расчету водного баланса за средний по водности год, который был определен в настоящей работе при помощи квантильного анализа, а именно, за 2011 год, определено процентное соотношение приходящей и расходной составляющих, благодаря которым, появляется возможность оценить зависимость параметра водности (уровня озера Ильмень) от расходов воды рек, являющимися притоками и расхода воды реки Волхов, по которой происходит сток воды из озера.

3. АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ УРОВЕННОГО РЕЖИМА ОЗЕРА ИЛЬМЕНЬ ОТ ПРИТОКА ВПАДАЮЩИХ РЕК

Насколько известно из предыдущей главы настоящей выпускной квалификационной работы, основной составляющей приходной водного баланса озера Ильмень является приток речных вод. Для того, чтобы оценить изменчивость уровня в многолетнем разрезе, обратимся к статистическому анализу рядов среднегодовых расходов на наиболее водных реках-притоках озера, а именно: река Мста, река Шелонь и река Ловать. Данная работа позволит нам оценить закономерность изменений водности как на реках-притоках, так, и, непосредственно, на самом водном объекте исследования.

В качестве исходных данных использовались многолетние ряды среднегодовых расходов воды в следующих створах наблюдений: река Мста – д. Девкино (1945-2020 гг.), река Ловать – г. Холм (1945-2020 гг.), река Шелонь – д. Заполье (1945-2009 гг.), озеро Ильмень – д. Войцы (1945-2023 гг.).

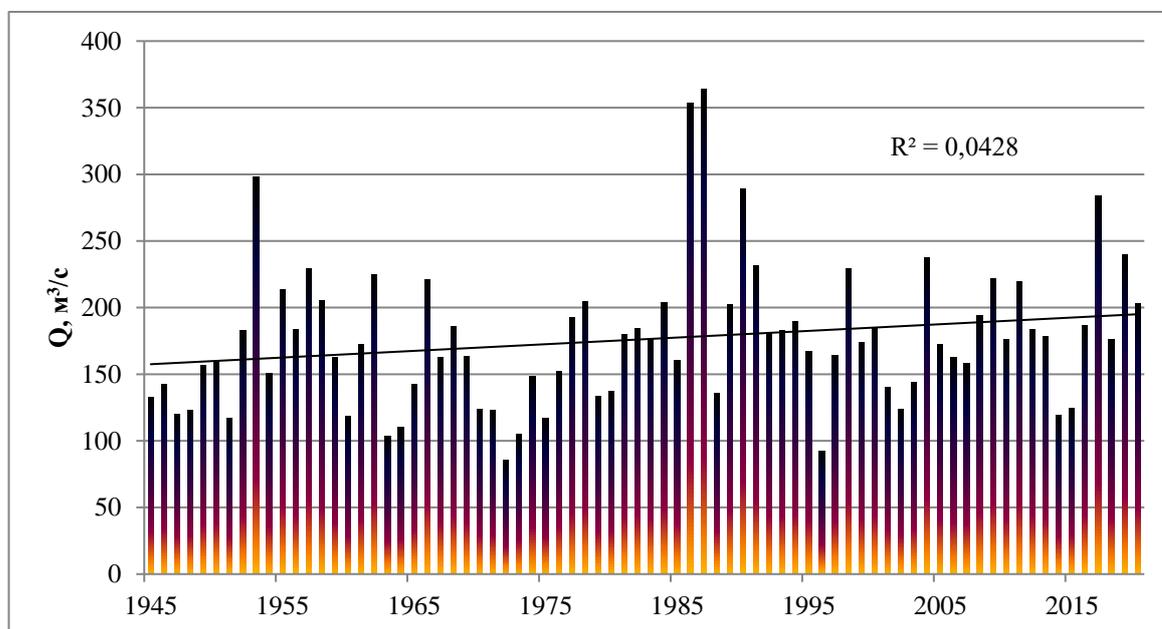


Рисунок 3.1 — Хронологический график ряда среднегодовых расходов воды р. Мста – д. Девкино с нанесением линейного тренда

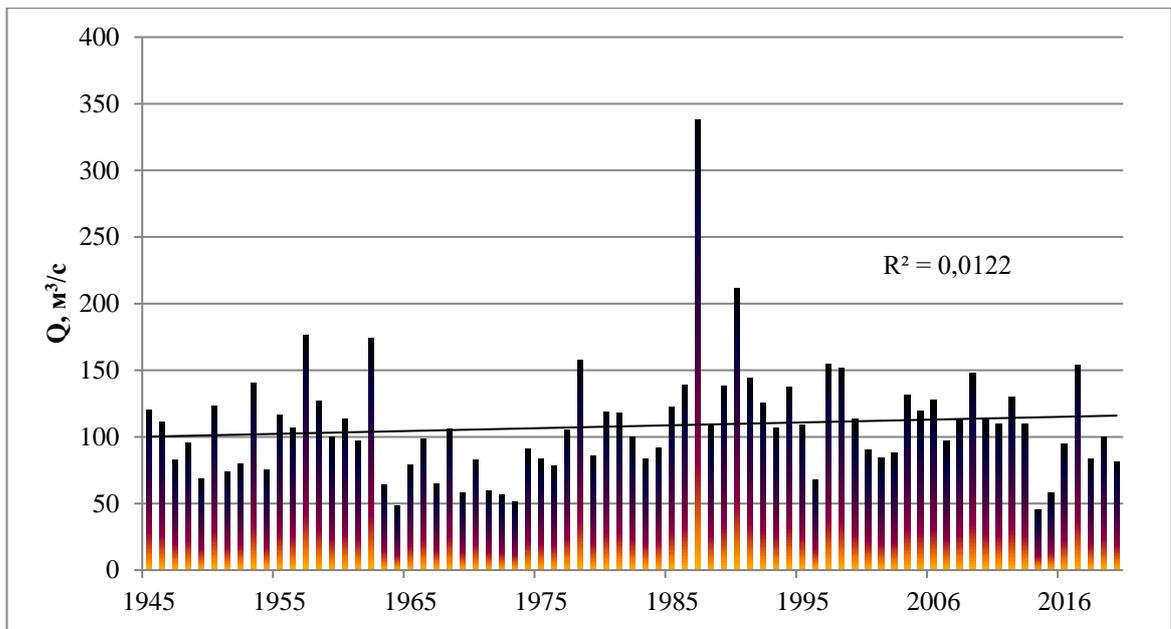


Рисунок 3.2 — Хронологический график ряда среднегодовых расходов воды р. Ловать – г. Холм с нанесением линейного тренда

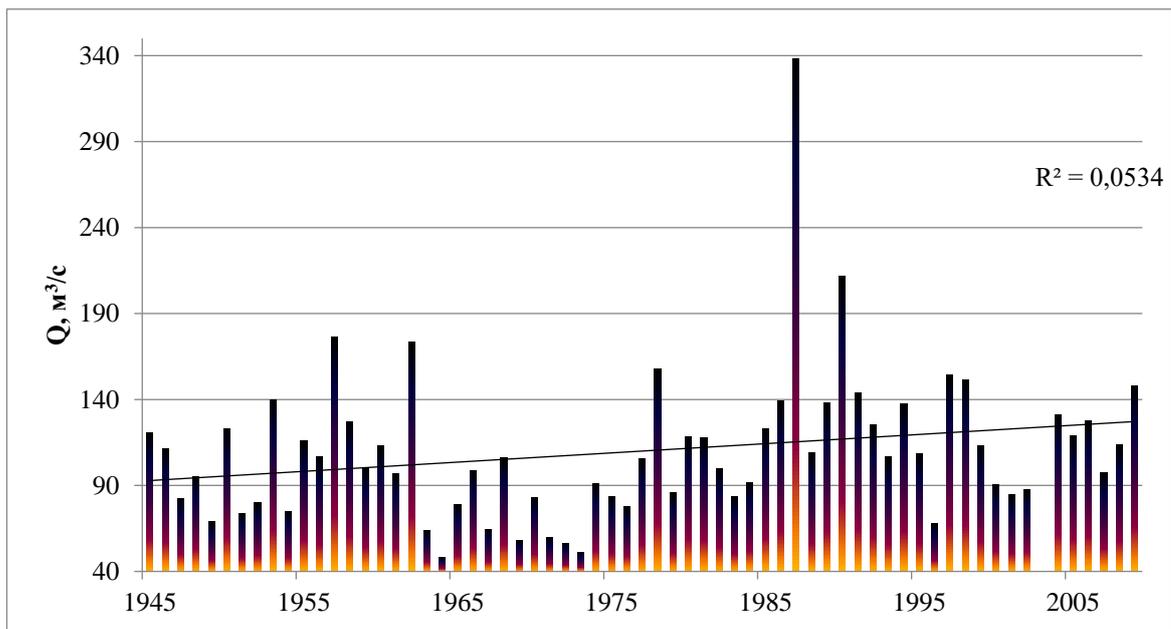


Рисунок 3.3 — Хронологический график ряда среднегодовых расходов воды р. Шелонь – д. Заполье с нанесением линейного тренда

По имеющим хронологическим графикам отчетливо видно, что периоды маловодья и многоводья на реках преимущественно сходятся. Далее был рассмотрен хронологический график многолетнего ряда среднегодовых уровней воды озера Ильмень в расчетном створе д. Войцы. График представлен на рисунке 3.4.

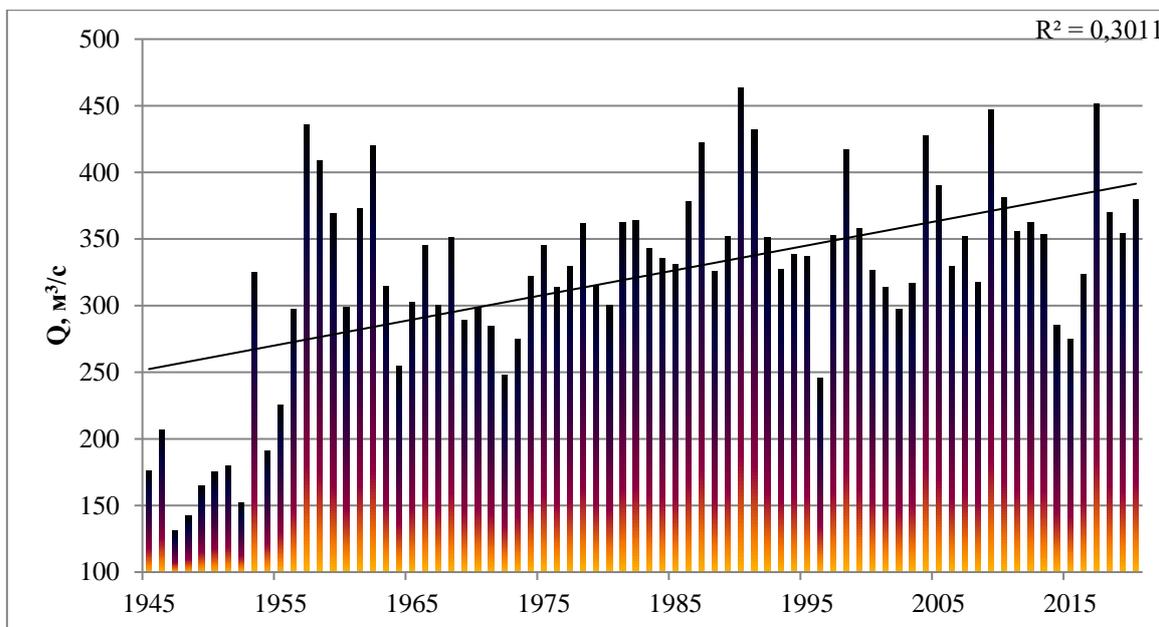


Рисунок 3.4 — Хронологический график ряда среднегодовых уровней воды оз. Ильмень – д. Войцы с нанесением линейного тренда

В рамках анализа хронологического графика среднегодовых уровней озера Ильмень в расчетном створе наблюдений д. Войцы можно сделать вывод, что по большей части, уровни воды в водном объекте изменяются с меньшей амплитудой, чем расход воды в реках, однако, можно наблюдать некоторую закономерность в пиках наибольшей и наименьшей водности.

В первую очередь, нужно отметить, что такие водные объекты как озера могут отличаться меньшей амплитудой колебания уровней в многолетнем разрезе, в отличие от водотоков. Во-вторых, озеро Ильмень является предметом большой антропогенной нагрузки, такой как, например, деятельность Волховской гидроэлектростанции (ГЭС-6), что можно заметить на графике в период до 1955 года, до ввода в эксплуатацию полного состава энергетического оборудования гидроэлектростанции, вследствие чего, сток реки Волхов оказался зарегулированным.

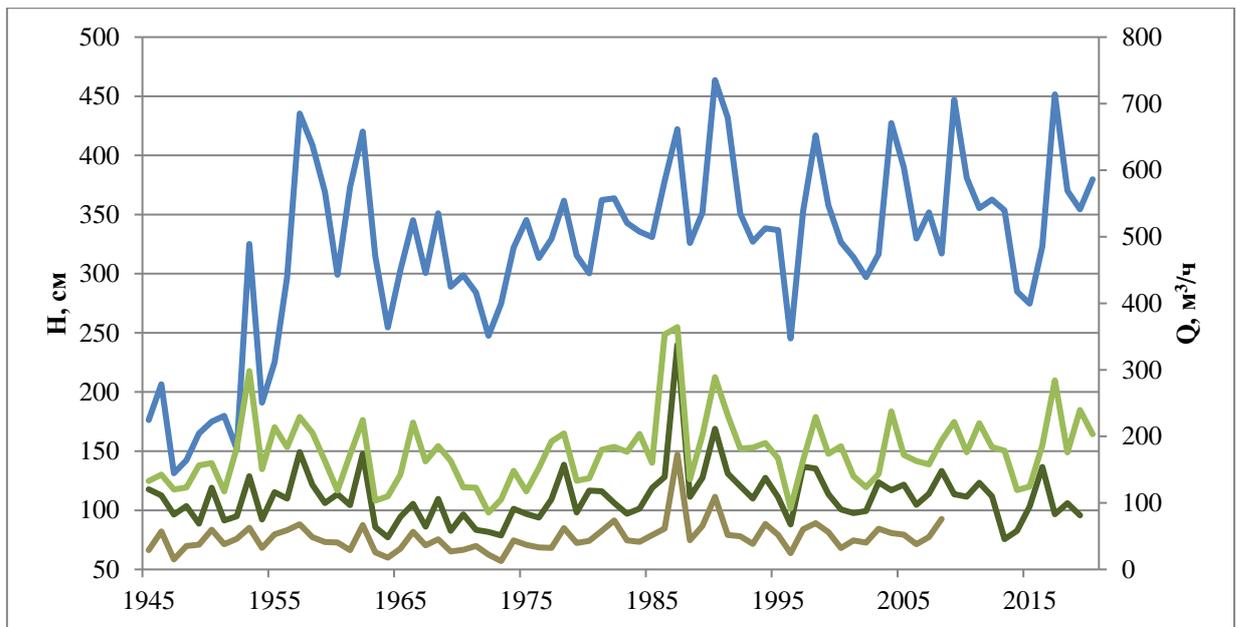


Рисунок 3.5 – Совмещенный хронологический график расходов воды и уровней воды

На рисунке 3.5 представлен совмещенный хронологический график хода расходов воды на реках-притоках и уровней воды в озере Ильмень, где синяя линия – уровни озера Ильмень, светло-зеленый – расходы воды реки Мста, темно-зеленый – расходы воды реки Ловать, коричневый – расходы воды реки Шелонь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом выполненных исследований, а именно: проведения анализа водности озера Ильмень с помощью методов квантильного анализа, водного баланса и статистической хронологии в многолетнем разрезе, является определение зависимости пиковых значений уровня воды в водном объекте – озере Ильмень от пиковых значений расходов воды на реках-притоках (Мста, Ловать, Шелонь). Кроме того, определено антропогенное влияние на уровень воды в озере со стороны Волховской гидроэлектростанции (ГЭС-6), являющейся регулятором стока воды из озера через реку Волхов.

Квантильный анализ позволил получить сведения о многоводных и маловодных годах, на основании расчета квантилей различной обеспеченности, что являлось необходимым для выбора расчетного года средней водности, для дальнейшего расчета водного баланса озера.

Результатом расчета водного баланса является определение роли в процентном соотношении приходной составляющей. Цель определения приходной составляющей как основного фактора водности – необходимость оценки зависимости изменений водности от приходящей воды в водоем, что и было выполнено при построении хронологических графиков в многолетнем разрезе измерений соответствующих гидрологических характеристик.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 *Богословский Б.Б.* Общая гидрология: учебник для студ. ВУЗов/ Богословский Б.Б. [и др.] – Л.: Гидрометеоиздат, 1984.–356 с.
- 2 *Евстигнеев В. М.* Речной сток и гидрологические расчеты.– М.: Изд-во МГУ, 1990. – 304 с.
- 3 *Измайлова А.В.* Современное состояние водных ресурсов естественных и искусственных водоёмов Российской Федерации и тенденции их изменения. – Дис. на соискание учен. степени д-ра геогр. наук. – Москва, 2019
- 4 *Кириллова В.А.* Озеро Ильмень // Природные ресурсы больших озер СССР и вероятностные их изменения. – Л. 1984.
- 5 *Мякишева Н.В., Догановский А.М.* Водный баланс и уровень воды озера Ильмень в разных временных интервалах // Труды IV Международного симпозиума по Ладожскому озеру . Великий Новгород. Россия. 2 – 6 сентября 2002 г. – СПб.: изд. НИИ химии СПбГУ, 2003, с. 175 – 179.
- 6 *Мякишева Н.В.* Климатическая система Земли: прошлое и настоящее. Учебное пособие – Санкт-Петербург : РГГМУ, 2022. – 194 с
- 7 Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2. Карелия и Северо-Запад. Ч. 1. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972.
- 8 Свод правил СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Стройиздат, 2004. – 72 с.
- 9 Краткая характеристика озера Ильмень [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [Озеро Ильмень: описание, глубины, реки, где находится \(ozeraireki.ru\)](http://ozeraireki.ru). Дата обращения 12.03.2025.
- 10 Озеро Ильмень. Происхождение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [Озеро Ильмень: где находится, происхождение, описание и характеристики \(iskatel.com\)](http://iskatel.com) Дата обращения 12.03.2025.

- 11 География Новгородской области [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
web.archive.org/web/20100306002527/http://geo.home.nov.ru/relyef.htm.
Дата обращения 08.04.2025.
- 12 Википедия. Ильмень [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
[Ильмень — Википедия \(wikipedia.org\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Ильмень) Дата обращения 09.04.2025.
- 13 *Кузьмина И. А., Кузнецова О. В.* Анализ результатов гидро и геохимического мониторинга озера ильмень // Вестник НовГУ. 2014. №76. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-rezultatov-gidro-geohimicheskogo-monitoringa-ozera-ilmen> Дата обращения 13.04.2025.

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Среднегодовые расходы воды

Таблица А.1 – Среднегодовые расходы воды р. Мста – д. Девкино

год	Среднегодовой расход воды Q, м ³ /ч
1945	133
1946	143
1947	120
1948	123
1949	156
1950	160
1951	117
1952	183
1953	298
1954	151
1955	214
1956	184
1957	229
1958	205
1959	163
1960	118
1961	173
1962	224
1963	104
1964	110
1965	142
1966	221
1967	162
1968	186
1969	163
1970	124
1971	123
1972	85.6
1973	105
1974	148
1975	117
1976	152
1977	193
1978	204
1979	133
1980	137
1981	180
1982	184
1983	177
1984	204
1985	160
1986	353
1987	364
1988	136
1989	202
1990	289
1991	232
1992	182
1993	183
1994	190
1995	167

год	Среднегодовой расход воды Q, м ³ /ч
1996	92.0
1997	164
1998	229
1999	174
2000	185
2001	140
2002	124
2004	237
2005	172
2006	163
2007	158
2008	194
2009	222
2010	176
2011	220
2012	184
2013	179
2014	119
2015	125
2016	186
2017	284
2018	176
2019	240
2020	203

Таблица А.2 – Среднегодовые расходы р. Ловать – г. Холм

год	Среднегодовой расход воды Q, м ³ /ч
1945	120
1946	111
1947	83
1948	95
1949	69
1950	123
1951	74
1952	80
1953	140
1954	75
1955	116
1956	107
1957	176
1958	127
1959	100
1960	113
1961	97
1962	174
1963	64
1964	48
1965	79
1966	99
1967	64
1968	106
1969	58
1970	83
1971	59
1972	56.5
1973	51
1974	91
1975	83
1976	78
1977	105
1978	157
1979	86
1980	119
1981	118
1982	100
1983	84
1984	91
1985	123
1986	139
1987	338
1988	109
1989	138
1990	211
1991	144
1992	125
1993	107
1994	138
1995	109
1996	67.6
1997	155
1998	152
1999	113

год	Среднегодовой расход воды Q, м ³ /ч
2000	90
2001	85
2002	88
2004	131
2005	119
2006	127
2007	97
2008	114
2009	148
2010	113
2011	109
2012	130
2013	110
2014	45
2015	58
2016	94
2017	154
2018	83
2019	100
2020	81

Таблица А.3 – Среднегодовые расходы воды р. Шелонь – д. Заполье

год	Среднегодовой расход воды Q, м ³ /ч
1945	29
1946	57
1947	15
1948	35
1949	37
1950	60
1951	38
1952	46
1953	63
1954	33
1955	53
1956	59
1957	68
1958	48
1959	41
1960	40
1961	29
1962	67
1963	26
1964	18
1965	31
1966	57
1967	36
1968	45
1969	27
1970	29
1971	35
1972	22.4
1973	13
1974	44
1975	37
1976	33
1977	32
1978	62
1979	40
1980	43
1981	58
1982	74
1983	44
1984	41
1985	52
1986	61
1987	173
1988	44
1989	65
1990	109
1991	52
1992	50
1993	38
1994	68
1995	52
1996	24.6
1997	61
1998	70
1999	56

год	Среднегодовой расход воды Q, м ³ /ч
2000	32
2001	44
2002	40
2004	61
2005	55
2006	52
2007	38
2008	49
2009	76

ПРИЛОЖЕНИЕ В – Среднемесячные уровни оз. Ильмень

Таблица В.1 – Среднемесячные уровни воды оз. Ильмень

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1945	33	46	60	222	310	236	162	134	129	252	302	229
1946	163	108	50	256	501	384	265	181	146	165	141	119
1947	67	34	8	233	395	305	211	132	81	47	30	33
1948	14	39	39	280	349	233	157	114	79	95	132	176
1949	140	96	82	240	336	282	269	183	125	86	55	85
1950	89	55	28	239	343	288	272	103	156	173	83	270
1951	246	191	123	353	390	292	196	129	97	68	43	30
1952	24	7	10	61	210	164	135	105	111	263	377	354
1953	298	235	169	393	430	322	281	345	342	388	351	348
1954	285	207	139	214	281	232	168	127	101	130	212	197
1955	181	159	142	45	527	528	406	278	169	113	86	68
1956	203	183	163	229	700	60	472	374	314	283	295	290
1957	305	295	301	465	593	531	447	384	414	522	519	449
1958	408	361	332	403	659	572	456	366	299	291	379	378
1959	355	346	328	546	640	508	397	309	254	247	265	233
1960	201	177	156	297	503	406	337	284	277	264	296	391
1961	418	377	417	519	521	448	344	301	313	278	264	276
1962	263	252	233	457	628	533	502	462	432	414	402	464
1963	408	343	288	328	479	377	285	247	235	237	274	276
1964	242	210	181	255	433	383	296	239	201	187	204	224
1965	239	220	204	296	552	478	376	299	262	238	242	228
1966	220	201	203	492	574	606	454	333	274	267	267	252
1967	222	194	200	396	491	412	326	262	239	242	305	318
1968	274	231	206	562	609	508	400	325	266	252	298	282
1969	250	218	184	258	497	446	332	264	229	224	243	323
1970	303	258	213	350	535	421	309	249	224	227	241	254
1971	233	244	226	427	436	342	292	248	217	227	262	256
1972	225	185	153	287	365	321	277	242	220	220	234	242
1973	230	202	178	329	389	342	284	258	253	256	280	296
1974	289	239	308	349	442	398	340	326	275	252	300	347
1975	429	414	393	548	522	402	304	251	230	220	216	215
1976	211	188	163	317	522	479	462	359	280	253	249	277
1977	268	233	208	399	520	413	319	296	281	300	332	383
1978	297	251	228	473	584	491	379	295	250	297	363	433
1979	366	301	252	398	533	438	320	276	229	209	209	255
1980	255	226	230	266	472	399	297	256	280	265	301	357
1981	375	333	295	474	545	441	324	240	217	275	398	431
1982	408	354	310	516	573	482	378	285	243	241	269	306
1983	374	379	331	539	527	422	319	248	214	219	252	291
1984	347	324	268	432	511	428	336	262	234	279	315	291
1985	260	225	192	318	543	468	385	305	266	289	357	363
1986	324	285	244	494	623	503	397	322	301	343	340	364
1987	329	278	233	323	561	554	496	508	514	492	402	376
1988	366	335	274	454	519	410	313	261	257	244	240	239
1989	237	364	502	547	484	364	284	275	273	252	324	317
1990	323	404	618	622	500	378	290	298	420	564	581	566
1991	509	447	402	570	582	549	519	426	335	269	261	313
1992	374	379	375	565	594	492	354	257	205	180	202	233
1993	247	302	300	488	541	418	307	261	263	281	279	238
1994	202	180	175	450	609	590	484	356	277	239	234	264
1995	264	268	434	531	573	480	360	264	215	205	214	235
1996	217	187	171	223	370	312	265	236	218	216	232	297
1997	290	260	361	435	517	480	435	317	244	235	309	352
1998	335	335	378	414	520	437	445	483	455	408	418	375
1999	346	346	320	582	670	527	381	275	222	205	201	218

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2000	241	237	250	414	492	383	348	377	330	274	268	305
2001	307	284	315	509	431	409	321	249	216	212	254	261
2002	238	304	443	528	474	361	280	217	190	181	177	172
2003	162	151	148	228	379	377	397	351	351	371	429	455
2004	449	398	378	595	578	500	448	374	333	311	370	394
2005	451	469	395	445	539	545	476	366	277	235	232	246
2006	245	218	187	328	444	451	378	299	303	314	370	420
2007	477	494	472	511	455	378	288	249	215	208	227	249
2008	264	256	364	494	494	388	303	258	231	233	251	269
2009	475	435	430	499	568	497	418	366	345	365	464	503
2010	439	365	302	551	610	523	412	301	261	232	264	312
2011	297	294	271	443	636	527	405	303	261	250	256	321
2012	380	352	299	404	555	457	375	297	257	257	342	377
2013	366	329	290	352	579	527	409	321	257	235	265	313
2014	366	342	314	360	354	319	275	236	208	210	215	221
2015	242	241	306	409	441	350	260	214	204	203	209	217
2016	228	251	291	377	446	367	319	344	311	281	296	367
2017	394	346	382	524	560	489	463	498	463	427	444	429
2018	488	467	403	482	573	450	342	277	242	234	241	242
2019	232	241	275	432	391	324	272	289	317	358	547	575
2020	566	538	558	511	452	403	328	266	233	221	234	248