



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Кафедра прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(Магистерская диссертация)

«МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ УРОВНЯ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА И  
ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
СТАТИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ»

Исполнитель: Иванова Эльвира Владимировна, студент группы ПО-М20-1-6

Научный руководитель: кандидат геогр. наук, доцент Густоев Дмитрий Владимирович

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

(подпись)

кандидат геогр. наук

(ученая степень, ученое звание)

Иванова Эльвира Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«10» июль 2022г.

Санкт-Петербург.

## Оглавление

Оглавление .....	1
Глава 1. ....	3
Введение.....	3
Обзор текущего состояния гипотез.....	5
Исходные данные.....	11
Глава 2. ....	12
Методология. ....	12
2.1. Статистический подход.....	13
2.2 Статистические методы прогнозирования. ....	14
2.3. Физико-статистические методы используются .....	15
2.4. Вероятностные методы прогнозирования. ....	17
2.5. Гидродинамические краткосрочные прогнозы.....	19
2.6. Автокорреляционная функция. ....	20
2.7. Взаимнокорреляционная функция. ....	22
2.8. Спектральная плотность.....	23
Общий вывод о методологии:.....	25
Глава 3. ....	26
Прогнозирование.....	26
3.1 Физико-статистические методы прогнозирования.....	26
3.1.1 Изучение кросс корреляции между уровнем воды в Ладожском озере и осадками.....	27
3.1.2. Изучение кросс корреляции между уровнем воды в Ладожском озере и затратами тела на испарение. ....	28
3.1.3 Изучение кросс корреляции между осадками и затратами тепла на испарение. ....	29
3.2. Возможности прогнозирования статистическим методом.....	31
3.2.1. Спектральный анализ уровня Ладожского озера. ....	31
3.2.2 Автокорреляционная функция уровня Ладожского озера. ....	33
3.2.3. Вейвлет анализ уровня Ладожского озера. ....	34
3.2.4 Спектральное разложение осадков над акваторией Ладожского озера	35
3.2.5 Автокорреляционная функция осадков, выпадающих над акваторией ладожского озера.....	36

3.2.6 Вейвлет анализ осадков.....	37
3.2.7 Отток тепла. Спектральная плотность.....	38
3.2.8 Автокорреляционная оттока тела за счет испарения. ....	38
3.2.9 Вейвлет разложение оттока тепла за счет испарения. ....	39
Общие выводы о проведенных анализах.....	40
Глава 4. ....	41
Прогнозирования статистическим методом. ....	41
4.1 Первичная статистика. ....	41
4.2 Спектральное разложение уровня Ладожского озера. ....	43
4.3 Автокорреляционная функция уровня Ладожского озера. ....	43
4.4 Прогнозирование статистическим методами.....	45
Вывод: .....	48
Заключение. ....	49
Используемая литература.....	51

## Глава 1.

### Введение.

Изучение межгодовых колебания уровня Ладожского озера являлось важной задачей для моего исследования, так же, как и возможности прогнозирования этого уровня.

В общих чертах, колебание уровня зависят от многих составляющих, таких как осадки, испарение, подземные воды и количества воды поступающего со стоком рек и количества ушедшей воды стоком Невы.

Существует внутригодовая изменчивость уровня, которая возникает за счет весеннего или летнего половодья-это высокий уровень во время него и низкий уровень до него.

Для меня интерес вызвали не ежегодные колебания, которые уже изучены, а межгодовая изменчивость, которая изучена мало, хотя является важной составляющей. Циклические многолетние колебания в Ладожском озере присутствуют, но их гидрометеорологическая причина не выявлена. Наблюдается чередование фаз разной водности на протяжении исследуемого периода.

На сегодняшний день необходимо рационально использовать водные ресурсы и охранять их. По мере того как новые задачи встали перед народными хозяйствами, появилась необходимость собрать более точную информацию для анализирования изменчивости водных ресурсов. Наиболее важное значение в этом вопросе имеет исследование межгодовых и внутригодовых изменений крупных пресноводных объектов. Ладога является важным источником для использования в хозяйстве, промышленности, а также по нему проходят важные водные пути. Изучение межгодовой изменчивости уровня Ладоги является методической основой для оценки запасов пресной воды и эффективной работы судоходства, промышленности и туризма. Так же актуально изучить межгодовую изменчивость необходимо для выявления причины этих колебаний, так как

они отличаются от колебаний других озер, схожую картину можно увидеть лишь в Каспии, но и там этот процесс малоизучен.

Важен прогноз уровня Ладоги на год для морских перевозок, туристической деятельности, аквакультурной деятельности и жителям, имеющих постройки вблизи береговой зоны.

Начать изучение Ладоги и её межгодовой изменчивости необходимо потому что это показатель изменения климата, в то время как климат является важным и главным показателем изучения гидрометеорологии.

Стоит цель составления прогноза межгодовой изменчивости с заблаговременностью 1-2 года, который будет полезен для судоходства, садковым хозяйствам, туристам и жителям.

Задачами данной работы является не только изучение изменения уровня Ладожского озера из года в год, но и изучения его внутренней структуры, но и проверка возможности прогнозирования статистическими методами и рассмотрение возможности физико-статистического прогноза.

## Обзор текущего состояния гипотез.

Было проведено немало исследований межгодовой и внутригодовой изменчивости, но нет ни одной подтвержденной гипотезы, объясняющей колебания уровня Ладоги до сих пор нет.

Уровенный режим изучал А.М. Догановский в своей работе «Уровенный режим озер-интегральный показатель климатических и экологических изменений» [14] и рассматривал озеро как индикатор процессов, которые протекают в бассейнах озер, реагирующие на колебания климата и антропогенный фактор.

В своей работе Догановский исследовал многолетние изменения уровня Каспия и связывал их с поголовьем осетровых, которое уменьшалось в следствии снижения площадей мелководий. Так же рассматривал уровни озер стран Балтики, где наблюдалась деградация экосистем в следствии зарастании территорий. На Ладожском озере были выявлены 20-30-летние флуктуации с помощью частотного фильтра Поттера.

Исследования позволили оценить связь уровня озер с элементами биоценоза и дали возможность судить о динамических процессах в экосистемах и дать оценку возможным изменениям климата.

Н.В. Ловелиус в статье «Ритмика стока Невы и уровня Ладоги под действием космических факторов» [15] изучал зависимость стока Невы, уровня Ладоги и периодами солнечной активности. В своих исследованиях он говорил о 11-13-летнем цикле, присутствующим в межгодовой изменчивости показателя величины уровня Ладоги и сверял его с ритмом солнечной активности, которая тоже около 11 лет и выявлял даты максимального отклонения расходов реки Нева и уровня Ладоги от средней многолетней нормы, определял их связь с солнечной активностью.



Но в итоге расчеты, связанные с эпохой перигелия/афелия не дали нужных расчетов, хоть и тенденции совпадали. Отмечал важность дальнейшего изучения экологического состояния водных систем Северо-Западной части России.

Филатова И.В. в своей диссертации «Изменение элементов водного баланса и уровня крупных озер» [18] в 1984 г. проводила исследования по межгодовой и внутригодовой изменчивости уровня озер и рассматривала её как методическую базу для описания количества пресноводных запасов, эффективной работы водного транспорта и возможные последствия при территориальном перераспределении водных ресурсов.

Выделяла важным обнаружить периодические и циклические колебания для дальнейшего определения тенденции и для выявления возможности прогнозирования.

Основное внимание было уделено Ладоге и её уровню, была представлена падающая тенденция, а именно 5 сантиметров на десятилетие. Выявлена связь уровня озера и стока реки Нева на сдвиге нуль и взаимодействие с осадками на 1 год с запаздыванием.

Предикторами для прогноза использовались: максимальный и минимальный уровень озера, среднегодовые значения, суммарный поверхностный приток, атмосферные осадки, сток реки Нева, среднегодовой уровень Онеги и Саймы, сток крупнейших крупных рек, впадающий в Ладогу и осредненные годовые величины повторяемости форм атмосферной циркуляции.

И в заключении выявлены циклические колебания 5-7 лет и 30 лет, не стационарность составляющих водного баланса, рассчитаны оценки статистических связей межгодовой изменчивости уровня озера и факторов. Выведено с помощью регрессионной модели уравнение с запаздыванием в 1 год, выполнены прогностические расчеты с использованием метода многомерной регрессии.

Калесник С.В. в публикации Ладожское озеро 1968 [11] проводил значимые исследования и тоже уделил часть своей работы уровню Ладоги.

Он высказывался о том, что по данным, полученным в период 1932—1958 гг., среднее значение уровня Ладожского озера равен  $457 \pm 9$  см ; в связи с тем, что дно Ладоги располагается ниже уровня моря, то его котловина является криптодепрессией.

В своей публикации автор говорил, о зависимости уровня от стока рек. Выделял то, что необходимо учитывать и впадающие реки в озера и вытекающую из него. Так же говорил, о двух фазах водности на протяжении года: первая фаза протекает с января по июнь и эта фаза характеризуется повышением уровня, а вторая фаза протекает с июня по конец года и она характеризуется постепенным понижением уровня. Изменение уровня озера на 1см приводит к изменению объема вод на  $0,175 \text{ км}^3$ .

Профессор, доктор геолого-минеральных наук Михаил Спиридонов (ВСЕГЕИ) не склонен списывать все на реки.

Что же касается нынешнего понижения уровня Ладоги, то он считает его странным. По сравнению с Каспием и Аралом, Ладожское озеро имеет огромное подземное питание. Его стали принимать в расчет только относительно недавно. Согласно расчетам ранее все были убеждены в том, что основной пищей озера являются реки, которые впадают в него. Сейчас стало известно о том, что в глубине, под дном есть вода, так называемый подземный сток озера.

Когда говорят о том, что север Ладоги поднимается и опускается в сторону Балтийского кристаллического щита, то обязательно нужно иметь в виду: это медленное движение и составляет оно около  $0,5 — 1$  мм в год, а колебания мы наблюдаем большие. Так же необходимо выделить, что это неравномерное движение, так как Фенноскандийский щит разделен на клавишные блоки для поднятия один за другим. Все озера на Карельском перешейке, самые большие, которые Ладога и Онега расположены на пограничной зоне Фенноскандийского щита (Русская платформа).



Как и в других трансгрессивных движениях, озеро наступает на южный берег. Весной, в некоторых местах в южной части было болото в сплошном камыше, чтобы добраться до воды, нужно было долго идти по камышам в резиновых сапогах. Этот процесс продолжится и впредь, постепенно подпирая снизу грунтовые воды, весь южный берег Ладожского озера сможет превратиться в болото. Это будет происходить постепенно.

Татьяна Гронская, отдел озер Государственный гидрологический институт:

По данным гидрометцентра, в 2014 году уровень воды в Ладожском озере находится на уровне 390 сантиметров от нулевой отметки. Но даже это не так много, как было зафиксировано в 1972 году – 360 сантиметров. Минимальный уровень зарегистрировали на уровне 1939 года – 336 сантиметров. У нас в Ладоге избыточное увлажнение, поэтому бояться исчезновения Ладоги не стоит. Не смотря ни на что, даже если на два метра упадет уровень воды, озеро все равно будет огромным. На 30-летнем цикле колебания уровня может быть видно, что изменения уровней есть, но крупное озеро имеет большую инерцию. Итоги маловодных и многоводного периодов могут сказаться не сразу или быстро, но тянутся долго.

В отношении обмеления южной Ладоги — да, на некоторых островах есть признаки значительного отступления береговой линии. Но поскольку берег очень пологий и неглубокий то кажется, что уровень сильно упал, но в вертикальном направлении падение незначительное. По данным ученых, в 2000 году на побережье озера произошло отступление от прежнего уровня на 30 сантиметров.

Есть и еще одна проблема – это заселение южного побережья, которое серьезно осложняется зарастанием озера. Там, где мелководье, летом температура воды очень высокая и вода прогревается быстро: водоросли размножаются стремительно в течение лета; затем они отмирают на зиму после того как их останки перенасытят воду биогенами (что не лучшим способом скажется на составе Ладожской воды).

Заведующий кафедрой гидрогеологии СПбГУ Аркадий Воронов откровенно говорил, что наукой изменение уровня Ладоги еще не объяснено.

Ладога зависит от внешних факторов и имеет огромный подземный сток. Хотя она действительно большая водная ёмкость, она питается реками. В озерах мало воды – в реке мало воды. По этой причине приходится проводить замеры уровня воды в родниках на территории области. По словам местных жителей, в время низких вод многие родники на территории природного парка «Вепсский лес» на востоке области пересохли и стали очень слабыми.

И самый удивительный факт — то, что происходит в глубинах Гдовского горизонта. Это артезианское пространство и оно сверху перекрыто глинами, чтобы защититься от внешних воздействий. И Гдовский горизонт упал, но и в этом случае он тоже не зависит ни от засухи, ни от наводнения.

На севере же от города Гдова можно использовать только гдовский горизонт, который не подходит для питьевых целей. Он соленый на юге. А теперь говорят о том, что это может быть связано с сильными закачками воды в горизонт и ее последующем падении на дно. Вода уходит. Но потом возвращается снова. По утверждению некоторых ученых, цикл колебаний уровней вод полностью соответствует 11-летнему периода солнечной активности.

По поводу прогнозов - это скорее оптимизм, чем катастрофа. На протяжении последних лет уровень воды падает на Ладожском озере, а также в подземной части озера. Но потом опять наступали полноводные годы, а все оставалось по-прежнему. Между озером и заливом существует перепад в 8 метров, что не позволит Санкт-Петербургу остаться без воды. Негативно то, что для судоходства это очень плохо.

В.И. Бабкин в своей работе «Оценка периодичностей и долгосрочный прогноз изменений уровня воды озер» [22] говорил следующее:

У больших озер есть свойство высокой изменчивости на протяжении периода. И любое изменение уровня озера, ведет за собой много последствий в плане изменения площади островов, корректировка уровня береговой линии, влияние на местную флору и фауну и другое. Так же присутствует влияние на промышленность, навигацию, экологию озера и туризм.

Прогноз уровня озера более чем на год важно для дальнейшего регионального развития.

Решить проблемы, связанные с гидрометеорологией поможет моделирование, за счет него можно выявить периоды, присутствовавшие в изменчивости озер и сделать прогноз с заблаговременностью больше года.

В своем исследовании изучал изменчивость уровня озер Веттерн, находящееся в Швеции и Ладожское озеро, которое находится в России. Шведское озеро является вторым по площади в стране, а Ладога является самым крупным озером в Европе и в России по своей величине уступает Байкалу.

На основе метода периодичности была создана модель Ладожского озера.

Для прогнозирования использовалось быстрое преобразование Фурье, которое представляет собой вычисление дискретного преобразования Фурье.

Было получено 2 прогноза: один из них методом периодичности, а второй методом быстрого преобразования Фурье. И лучшую картину показал метод периодичностей, но этот метод требует доработки, чтобы учесть синусоиды с высокими частотами.

Метод быстрого преобразования Фурье, в котором использовалась полная сумма синусоид хорошо предсказал экстремальные минимальные и максимальные значения уровней озера Веттерн и Ладоги.

### Закключение.

Ни одна из текущих гипотез не объясняет изменения уровня Ладожского озера настолько, чтобы была создана прогностическая модель.

### Исходные данные.

Уникальный ряд уровня Ладожского озера был составлен из двух рядов данных. С 2012 по 2021 были альтиметрические данные с Интернет-ресурса Hidrolare, а с 1859 по 2012 это осредненные комплексные данные постов , где ведутся непрерывные наблюдения за уровнем Ладожского озера и всеми остальными метеорологическими и гидрологическими параметрами.

В 2009 году Росгидрометом была создана компания Hidrolare. Она была основана на базе Государственного гидрологического института. Hidrolare вместе с другими центрами входит в систему «Глобальная наземная сеть-Гидрология» (GTN-H). Данная компания предоставляет данные по гидрологии мировых озер и водохранилищ (сегодня около 550 водоемов). Ее возглавляет Всемирная метеорологическая организация (ВМО).

Все данные были объединены в один ряд, длиной 164 года (1859-2021 год) и осреднены по годам, тем самым приведены к одной дискретности, за счет этого потерялась мелкомасштабная структура, но для задачи изучения межгодовой изменчивости подходит.

Уровень Ладожского озера представлен относительно Балтийской системы отсчета.

## Глава 2.

### Методология.

С точки зрения общей концепции, прогнозирование - это процесс предсказания будущего состояния на основе имеющихся составляющих, а также возможных перспектив. Прогноз используется в различных областях человеческой деятельности: экономике, социологии и демографии, политологии, метеорологии. И многих других. Самый наглядный пример использования прогнозирования в жизни человека - это пользовательский прогноз погоды.

Согласно этому мнению для эффективного использования прогностических данных исследований необходимо применение определенных методов, в том числе ряда методик предсказания. Начало прошлого века, когда ученые начали заниматься исследованиями в данной области и появились первые научные исследования по этому направлению было предложено всего несколько методик. По данным на данный момент таких методов много (более 150), но в реальной жизни используются только несколько десятков основных способов прогнозирования.

Данное означает что, с учетом сферы их пользования или цели прогнозирования выбор находится в зависимости не только от сферы их использования, так и наличия у исследователя конкретных инструментов анализа.

## 2.1. Статистический подход.

Стоит указать, что атмосфера- это нелинейно динамическая система, и как следствие детерминистски её предсказать невозможно. По этой причине статметоды и моделирование являются существенным элементом прогнозирования. Согласно этим моделям, статмодели условно можно разделить на 2 подгруппы: стохастическая, где предиктанты и предикторы случайные величины и детерминистическая, где есть детерминистическая связь и предикторы с предиктантами являются физическими величинами.

В общих чертах, все статметоды прогноза имеют две группы: основные методы (методы, которые используются на основе данных наблюдений) и те методы, которые могут быть использованы для оптимизации численных прогнозов.

Классические методы: Предполагается, что предикторы и предиктанты являются данными наблюдений. Базируются на независимых статистических связях между атмосферными процессами и явлениями погоды.

При этом понятие функции, характеризующей какой-либо физической механизм, рассчитывается в каждый период времени по величине аргументов ее предшественников в предшествующие периоды времени. Ее аргументы делаются предикторами. На качество метеопрогноза сказывается выбор необходимых предикторов. Выбор такого предиктора базируется на знании прогнозиста, который сможет правильно дать физическое обоснование и сопоставлении процессов с процессами, возникающих в системе океан-атмосфера. Есть условия, которые должны быть учтены при выборе предиктора. В каждой конкретной географической точке атмосферные процессы непредсказуемы и непостоянны в прошлом. И в этом случае, если будет проводиться зональное осреднение, то можно рассчитывать на возможность прогноза.

Затруднение в понимании связи с предиктантами обычно отражает отсутствие физического смысла связи. Различают синоптико-статистические и статистические статметоды.

## 2.2 Статистические методы прогнозирования.

Статистические методы прогнозирования используются преимущественно для обработки результатов, которые характеризуются случайной величиной. Метеорологические данные можно отнести к случайным величинам, так как они формируются под воздействием различных случайных факторов. Таким образом, статистические методы обычно используют для разработки краткосрочных прогнозов. Эти методы можно назвать методами экстраполяции, то есть для прогноза используют многолетние ряды наблюдений, то есть данные используют за несколько лет.

Во время разработки прогноза необходимо выявить влияние факторов на прогнозируемую величину и такая зависимость от факторов получила название корреляция. При корреляционной связи значение аргумента может соответствовать нескольким значениям функции, при функциональной связи значению аргумента соответствует одно значение функции.

Перед началом прогноза делается анализ ряда, для этого прогнозируемый ряд необходимо разбить на элементарные компоненты, такие как случайная составляющая, период, и тренд. Проводится этап первичной статистики с визуальным изучением ряда — здесь выявляется среднее значение значение исследуемого ряда, проверка наличия инерции, чтобы оценить возможность использования инерции в прогнозе, корреляционный анализ для выявления связи компонент, анализ спектральных составляющих. Оцениваются значения компонент и описываются статистически. За счет графического анализа, первичной статистики, корреляционного анализа и спектрального разложения можно уже оценить возможность прогнозирования ряда и сформировать прогноз.



В дальнейшем проводится прогнозирование компонентов на основе уравнения, включающего периодическую, случайную и трендовую составляющую и оценка адекватности модели и значимости коэффициентов. Используется авто регрессионный анализ, анализ преобразования Фурье и анализ трендовой составляющей. Оцениваются трендовые коэффициенты, коэффициенты авторегрессии и Фурье, а так же качество полученных компонент уравнениями.

Как итог: готовый прогноз на основе оптимального уравнения. На данном этапе проводится анализирование ошибок прогнозирования и предоставляются доверительные интервалы прогноза. Оценивается эффективность практического применения.

Плюсы метода — это высокая достоверность и наличие большого количества доступных программных обеспечений.

### 2.3. Физико-статистические методы используются

Для этого направления подходят наиболее ранние исследования в области исследований длительных прогнозов. Когда еще нет длинных архивов, синоптических карт, следовательно и, синоптические методы прогноза не могут развиваться. Данный метод остается актуальным в настоящее время и сейчас является основным направлением для поиска новых факторов прогнозирования погоды. Долгие аномалии погоды можно предсказать с помощью физического статистического подхода. Во время начального развития долгосрочного прогноза прогнозисты обычно анализировали воздействие внешних, по отношению к атмосфере, источников/стокам тепла.

Принципы, на которых базируется ФС подход, заключаются в следующем:

1. Атмосфера – это единая и непрерывная среда, в следствии чего: изменения в одной зоне атмосферы передаются на другие зоны атмосферы с задержкой и как правило с изменением характера возмущения.

2. Основная часть атмосферы остается неизменной, и потому отрицательные отклонения давления в некоторых частях планеты обязаны сочетаться с положительными отклонениями.

3. Присутствует взаимосвязь среди аномалиями циркуляции в достаточно удаленных районах, как во время одного сезона и на протяжении нескольких сезонов с определенным интервалом времени.

На практике физико-статистические прогнозы состоят из того, что сначала определяются физические отношения функции отклика (изучаемого процесса) с основными факторами и только потом строятся прогностическая модель. Предосторожность прогнозирования зависит от инерционных факторов, влияющих на изучаемый механизм. Методы, основанные на физических принципах, в основном основываются на интегральных уравнениях баланса какой-либо субстанции или уравнения гидро- и термодинамики.

Из-за отсутствия необходимой информации для вычисления некоторых компонент вычисление некоторых компонент не всегда возможно, поэтому их учет осуществляется косвенным (статистическим) или параметрическим путем. Таким образом, суммарный теплообмен океана и атмосферы для многих районов океанов можно оценить с помощью разницы температур воды в приводном слое.

Первое предложение по поводу долгосрочного прогнозирования, предложенное М.И. Юдиным в отношении долгосрочного прогноза погоды.

При нем все исходные данные подвергаются процедуре разложения на естественные ортогональные элементы. Во время реализации прогнозов берется всего лишь несколько первых коэффициента разложения,

описывающего весомую долю дисперсии фактором и не содержащего их мелких колебаний.

Расчет ряда коэффициентов линейной корреляции среди показателями разложения полей предиктора и предиктанта и определяются наиболее важные связи. Подготовлены ежедневные расчеты связи, учитывающие новые поступления информации в прошлом году. Из отобранных самых важных и независимых друг от друга факторов возникают предсказания множественной регрессии. На основе полученных формул можно рассчитать коэффициент разложения будущих полей температуры и осадков. Ну и наконец, восстанавливаются эти поля. Это является прогнозной составляющей этого метода.

Общие методы многомерного статистического анализа применяются для физико-статистического моделирования, однако доминирующая роль в этом процессе принадлежит методу множественной регрессии.

#### 2.4. Вероятностные методы прогнозирования.

Как правило, традиционные прогнозы погоды составляются в категорической форме. Для потребителя нет никакой гарантии того, что прогноз сбудется.

Прогностические значения близки к климатическим, и информация категорических прогнозов становится недостаточной. Чтобы понять, насколько важна информация прогнозов погоды для искушенного потребителя, стоит учесть, что для него наибольшую ценность представляют предсказания в вероятностной форме. На основе статметодов математики возможно прогнозировать вероятность события, используя методы математической статистики.

- Предсказуемое распределение климатической изменчивости. Стандартная методика, которая применяется это климатический прогноз.

- Методика априорных вероятностей. Базируется на архивных материалах.

- Для определения вероятностных значений функции регрессии используется формулировка прогноза в форме доверительных интервалов. Чтобы определить вероятность события, необходимо провести регрессионный анализ вероятностей событий. Регрессивная оценка вероятности событий - простой и действенный метод анализа.

При разработке объективных прогнозов, должны учитываться некоторые предположения, сделанные в процессе. При создании долгосрочного прогноза погоды роль прогнозиста очень важна. Он может давать субъективные оценки, основанные на субъективной оценке ситуации.

Для разработки прогноза в зависимости от метода его разработки, численного гидродинамического или синоптического, а также статистических методов он все равно включает допуск прогнозиста.

Из-за неопределенности будущего состояния атмосферы создание абсолютно объективных прогнозов невозможно.

Используются для уточнения представление в виде вероятностей. Прогнозист представляет прогноз в виде доверительных интервалов, которые содержат вероятность выполнения прогноза.

Экспертная оценка может помочь снизить уровень неопределенности. Они будут согласованы между собой качественными и количественными методами.

## 2.5. Гидродинамические краткосрочные прогнозы.

Современные возможности оперативной гидродинамики могут давать более точные прогнозы на короткие сроки.

Меняются возможности электронных вычислительных машин: те расчеты, которые могли занимать около нескольких суток лет 30 назад, сегодня уже без особых усилий делаются за минуты. Повысилось и знания в геофизической гидродинамики.

Гидродинамический краткосрочный прогноз объединил в себе достижения на сегодня для более точного прогнозирования.

Прогноз погоды такого типа на данный момент используется как основной источник прогнозов общего предназначения. Такие прогнозы можно встретить на сайтах прогнозов погоды общего пользования, информация представляется на несколько суток с дискретностью в 3 часа. В общем доступе можно увидеть погоду в интересующем регионе, предоставляются такие данные как температура воздуха, давление, направление и сила ветра, осадки и облачность.

Гидродинамические краткосрочные прогнозы обладают высокой точностью и детализированностью за счет развития науки в области гидрометеорологии. Прогнозы такого типа дают значения ветра с указанием скорости, направлением и силы на порывах, атмосферного давления, облачности с описанием облаков всех 3-х ярусов, количества выпадаемых осадков и в какой форме, температуру воздуха фактическую и ощутимую с учетом ветра и влажности.

Краткосрочные прогнозы используются для предупреждения опасных природных явлениях и такие прогнозы классифицируют как специализированные.

## 2.6. Автокорреляционная функция.

Автокорреляция или последовательная корреляция в случае дискретного времени, представляет собой связь сигнала с задержкой самого себя в зависимости от задержки. Неофициально это сходство между наблюдениям как функция временного лага между ними. С помощью анализа автокорреляции можно найти повторяющиеся паттерны, такие как наличие периодических сигналов и шумовых эффектов или определить недостающую основную частоту в сигналах с гармоническими тонами. В основном она применяется в обработке сигналов для анализа функций или рядов значений, таких как сигналы временной области.

Для различных областей науки существуют разные определения автокорреляции. Не все они эквивалентны. В некоторых областях термин используется в качестве взаимозаменяемого с автоковариацией.

По сути, единичные корневые процессы, трендовые стационарные процессы, авторегрессионные процесс и реакции скользящего среднего - это специфические формы процессов с автокорреляцией.

Автокорреляция представляет собой меру степени сходства между данными временного ряда и запаздывающей версией этого временного ряда в течение последовательных периодов времени. Он похож на вычисление корреляции между двумя разными переменными, за исключением того что в автокорреляции мы получаем связь между двумя различными версиями  $X_t$  и  $X_{t-k}$  одного временного ряда.

В соответствии с измерениями временных рядов  $1, 2, \dots, N$  в моменты времени  $X_1, X_2$  и...  $X_N$ , автокорреляционная функция  $\text{lag } k$  определяется как:

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (Y_i - \bar{Y})(Y_{i+k} - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^{N-k} (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Автокорреляция  $+1$  имеет совершенно положительные значения, а  $-1$  представляет собой абсолютно отрицательную корреляцию.

Для того, чтобы выявить случайность во временном ряду, применяется тест автокорреляции. Многие статистические процессы предполагают, что генерируемые данные случайны. В случае, если мы хотим проверить автокорреляцию лагов  $1$ , то нам необходимо провести проверку на случайную корреляцию.

Понять, есть ли взаимосвязь между прошлым и будущим значением временных рядов, проверяется за счет запаздывания между различными значениями.



## 2.7. Взаимнокорреляционная функция.

Перекрестная корреляция — это измерение, которое отслеживает движения двух или более наборов данных временных рядов относительно друг друга. Стандартный способ определения перекрестной зависимости — использование метода перекрестной корреляции.

По этой причине перекрестная корреляция может обнаружить любые периодичности в этих данных, а также выявить любые периодичности в них.

Кросс-корреляция показывает насколько схожи ряды при смещение одного относительно другого на временной лаг. Подобная природа имеет место быть и в кросс-корреляции, которая является аналогом свертки двух функций. Кросс-корреляционную функцию можно назвать автокорреляцией сигнала с самим собой.

При расчете кросс-корреляции для начала задается количество сдвигов, необходимых для анализа, оптимально это количество лагов меньше длины ряда в 3 раза, если ряд короткий (около 30 значений), и в 10 раз меньше, если рассматриваются длинные ряда (около 1000 значений).

Проводится проверка на значимость коэффициентов корреляции и значения кросс-корреляции, которые по модулю превышают уровень значимости, считаются значимыми.

По полученным значениям можно определить связи между характеристиками и выявить синхронность или асинхронность по сдвигам значимых коэффициентов.

По сдвигам, отличным от нуля и являющимися значимыми, можно проверить возможность прогнозирования ряда и сопоставив его с физическим смыслом получить сроки заблаговременности.

## 2.8. Спектральная плотность.

Традиционный метод исследования структурной организации стационарных временных рядов — это использование такого инструмента, как дискретное преобразование Фурье. Можно использовать это преобразование, которое позволяет оценить спектральную плотность ряда.

Данный метод используется для:

- нахождения периодических составляющих ряда
- нахождение квазипериодических составляющих ряда
- оценка адекватности модели
- интерполирование ряда
- определение связи между несколькими рядами

Суть спектральной плотности то, что случайный процесс можно представить в виде суммы гармоник.

Спектральную плотность случайного временного ряда можно определить тремя способами — это преобразование Фурье, корреляционная функция и метод аналоговой фильтрации.

При использовании метода Фурье для определения спектральной плотности используется метод периодограмм. Реализация стационарного случайного процесса представляется в виде ряда Фурье и составляются в виде выражений, которые имеют название спектральных характеристик реализации.

Полученное разложение представляет собой преобразование Фурье функций мощности случайных процессов, а не просто преобразование Фурье случайного процесса.

График полученный преобразованием Фурье — это и есть фазовый спектр, а график модуля амплитудный спектр.

## Свойства преобразования Фурье:

1. Линейность. По сути, если мы возьмем какую-то линейную комбинацию функций и переведем ее в образ Фурье этой комбинации, преобразование этого образа будет такой же линейной комбинацией образов этих функций.

2. Амплитудный спектр не зависит от сдвига сигнала по времени. В случае если переместить функцию в стороны по оси  $x$ , то изменится лишь ее фазовый спектр.

3. Пропорциональность сжатия (растяжения) по шкале частот. При растяжении (сжатии) функции по оси времени пропорционально растягивается (сжимается) фурье-образ, который находится в диапазоне частоты.

4. Можно привести свертку функций к поточному перемножению их фурье-образов и наоборот - поточечное объединение функции со свертки ее Фурье-образов.

5. Симметричность. Поэтому из этого свойства следует, что в фурье-образе действительной функции (то есть «реального» сигнала) амплитудный спектр всегда четная функция, а фазовый спектр — нечетный.

6. С помощью преобразования Фурье, можно сохранить «энергию» сигнала. Понятие осмыслено лишь для сигналов конечной длительности, энергия которых бесконечна. Оно показывает нам то обстоятельство что спектр таких сигнала на бесконечность быстро приближается к нулю. Однако именно поэтому на графике спектра чаще всего показывается «основная» часть сигнала, которая составляет важную долю энергии - остальная его сторона уходит в нуль.

Определение спектральной плотности, используя корреляционные функции, состоит из преобразования Фурье от ковариационной функции. Рассчитывается функция взаимной спектральной плотности процесса.

Общий вывод о методологии:

Большинство прогностических схем основаны на модели развития исследуемого процесса, которая может быть представлена в виде некоторой прогностической схемы. При этом нередко бывает неважно, насколько глубока физическая или математическая форма этой модели.

Чтобы оценить адекватность модели, необходимо учесть что:

- Модель использует один входной сигнал — сам процесс, который изучается;
- в расчетах алгоритмы автоматизированы;
- Нет необходимости использовать мощные вычислительные ресурсы и проводить сложные расчеты
- Результаты расчетов довольно простые, они понятны, наглядны и доступны для понимания.

Главная цель - объединить все самые известные модели на сегодняшний день в единый программный комплекс, который основан на статистико-вероятностных методиках.

На сегодняшний день хорошо развито аналитическое и диагностическое направление, нежели прогностическое. Благодаря этому теория может хорошо описать, удовлетворительно объяснить и плохо предсказать.

Совершенствовать модели необходимо для совершенствования теорий, а также уточнения и наоборот.

## Глава 3.

### Прогнозирование.

#### 3.1 Физико-статистические методы прогнозирования.

Кросскорреляционный анализ может быть полезен для получения представления о взаимосвязи уровня Ладожского озера и осадков с затратами тепла на испарение на разных сдвигах по времени.

Уровень воды в озере, по определению, чувствителен к осадкам, которые выпадают над его зеркалом. Чем больше количество выпавших осадков, тем больше уровень воды в озере, но с другой стороны тоже есть факт испарения воды с поверхности озера, в следствии чего происходит уменьшение уровня воды в озере. Таким образом, наблюдается баланс поступающей воды в озеро за счет осадков и отступаемой за счет испарения.

Были проведены расчеты для выявления наличия связи характеристик и в дальнейшем для проверки возможности расчета физико-статистическим методом.

Были взяты три ряда данных, таких как уровень воды в Ладожском озере, количество осадков и затраты тепла на испарение за 73 года с 1949 года по 2021 год.

При поиске опережающих факторов, в процессе проведение статистического анализа, вместо оценки корреляции между двумя временными рядами было решено исследовать корреляцию между временным рядом уровня и временными рядами осадков и затрат тепла на испарение с временным сдвигом путем способа кросс корреляции.

### 3.1.1 Изучение кросс корреляции между уровнем воды в Ладожском озере и осадками.

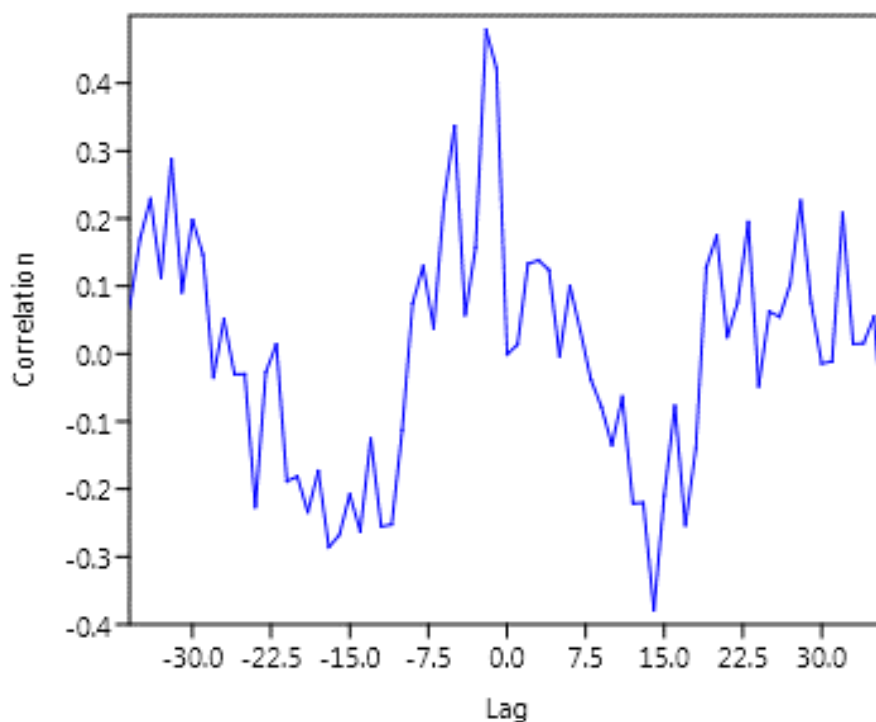


Рисунок 1. Взаимно корреляционная функция уровня Ладожского озера и осадков.

На ВКФ не присутствуют значимые коэффициенты. Максимальный по модулю является сдвиг осадков на 2 года (с опережением уровня) и коэффициент корреляции на этом сдвиге составляет 0,48. Это не позволяет прогнозирование на основе физико-статистического метода, так как коэффициент корреляции не значим.

### 3.1.2. Изучение кросс корреляции между уровнем воды в Ладожском озере и затратами тела на испарение.

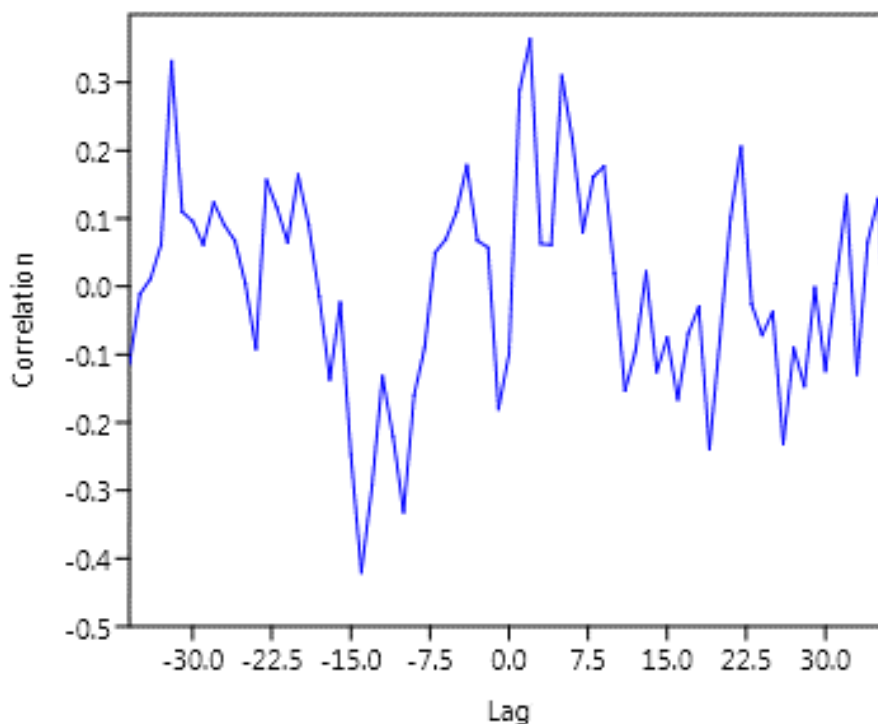


Рисунок 2. Взаимно корреляционная функция уровня Ладожского озера и затратами тепла на испарение.

На ВКФ отсутствуют значимые коэффициенты. Можно выделить максимальный из имеющихся-это на сдвиге 14 лет и значение его 0,42, что тоже слишком мало для прогноза физико-статистическим методом.



### 3.1.3 Изучение кросс корреляции между осадками и затратами тепла на испарение.

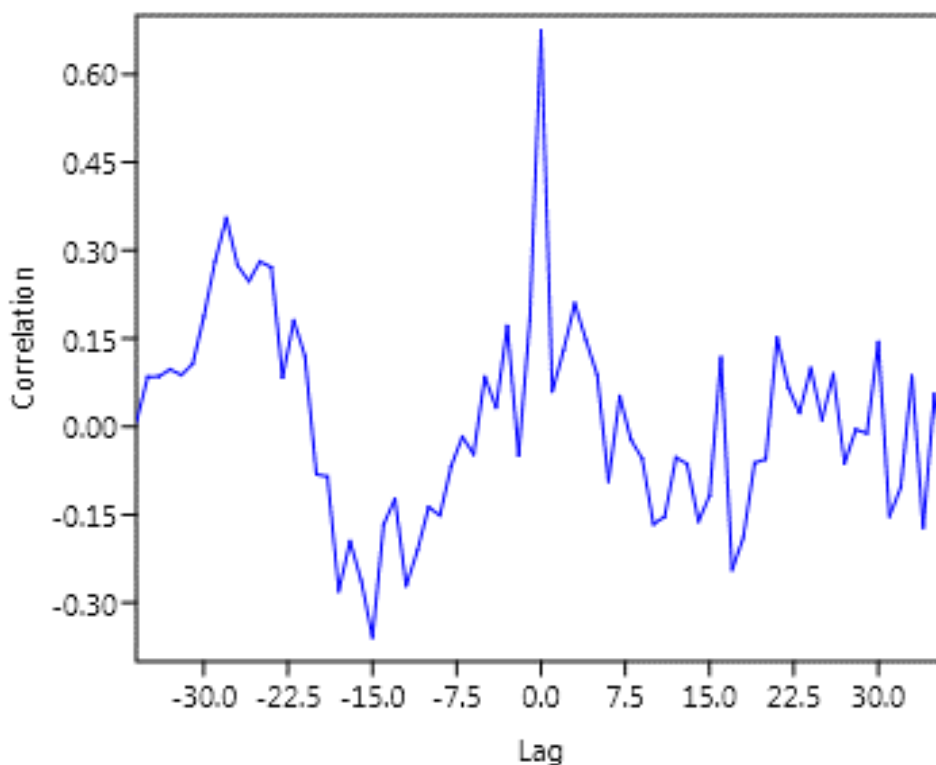


Рисунок 3. Взаимно корреляционная функция осадков и затратами тепла на испарение.

Так же для исследования был построен график ВКФ для осадков и затратами тепла на испарение, на графике наблюдается один значимый коэффициент на уровне 0 и составляет 0,67, это связано с тем, что осадки и затраты тепла на испарение связаны синхронно. По данным синхронной связи осадков и затрат тепла на испарение показывают, что «осадочная» влага почти вся уходит из региона после того как вода полностью испаряется и уносится к акватории Ладожского озера.

С учетом того что ни в одном случае не наблюдались значимые коэффициенты, следует вывод: что построить физико-статистическую модель, которая впоследствии может быть использована для прогнозирования уровня воды в Ладоге невозможно.

## 3.2. Возможности прогнозирования статистическим методом.

### 3.2.1. Спектральный анализ уровня Ладожского озера.

На графике представлен спектральный анализ уровня Ладожского озера с 1949 по 2021 год.

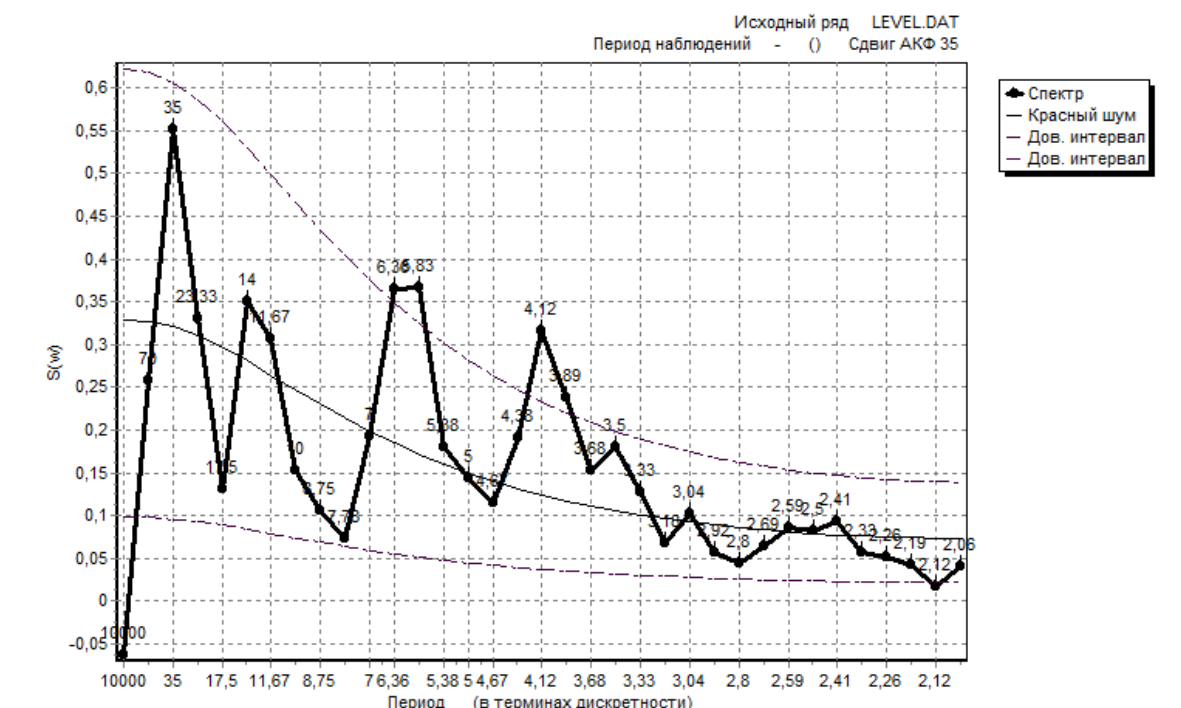


Рисунок 4. Спектральная плотность значений уровня Ладожского озера с 1949 по 2021 год.

На графике представлена спектральная плотность уровня Ладожского озера. Выделяется затухающая экспоненциально синусоида. На периодограмме наблюдаются пики: 35 лет, 11 лет, 6 лет и 4 года.

Пик в 35 лет, говорит о присутствии цикла Брикнера. Он является многовековым изменением климата, проявляющимся во время перехода от холодной или сухой зимы в теплую и сухую погоду на протяжении среднего 35-летнего периода. Цикл Брикнера мог достигать и пятьдесят лет. В 17 веке, когда климат на территории России стал более теплым, а также появились новые климатические условия, цикл был обнаружен в температурных условиях северо-западного региона Европы.

11-летний связан с солнечной активностью и характеризуется увеличением количества солнечных пятен на Солнце в течении 4 лет с солнечной магнитной активностью, а в дальнейшем на протяжении 7 лет понижением количества этих пятен. Так же в этот период наблюдается внутривековой цикл изменений пути циклонов, а именно: когда солнечная активность минимальна, то пути циклонов в умеренных широтах сдвигаются к экватору, если сравнивать с тем, где они располагаются во время высокой солнечной активности, амплитуда смещения составляет около  $1,5^\circ$ .

6-летний цикл, связанный с автоколебаниями системы океан-атмосфера.

4-летний цикл связан с ритмом изменения температуры воздуха в северной части Атлантического океана, он был выявлен Е.Д. Ершовой впервые и подтвержден дальнейшими исследованиями В.В. Шулейкиным. Механизм возникновения его связан с перемешиванием теплых вод Гольфстрима в Полярном бассейне и дальнейшим их возвращением в Атлантику охлажденными.

### 3.2.2 Автокорреляционная функция уровня Ладожского озера.

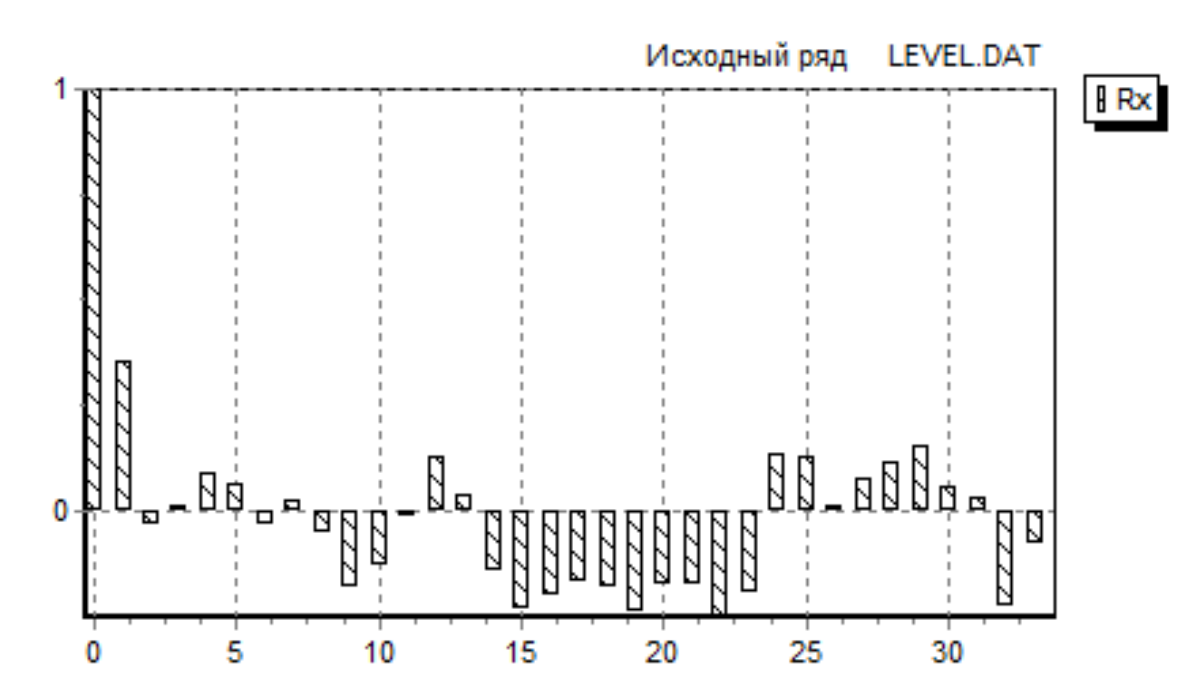


Рисунок 5. АКФ уровня Ладожского озера.

Из графика автокорреляционной функции можно сделать вывод о внутренних составляющих, таких как инерционность, она определяется по первому пересечению сдвига с нулем, это у нас 3, а значит можно говорить о малой инерционности процесса изменения уровня Ладожского озера. Локальные максимумы на графике отсутствуют, что говорит о том, что периодичность изменения уровня Ладожского озера с 1941 по 2021 год не имеет цикличности.

### 3.2.3. Вейвлет анализ уровня Ладожского озера.

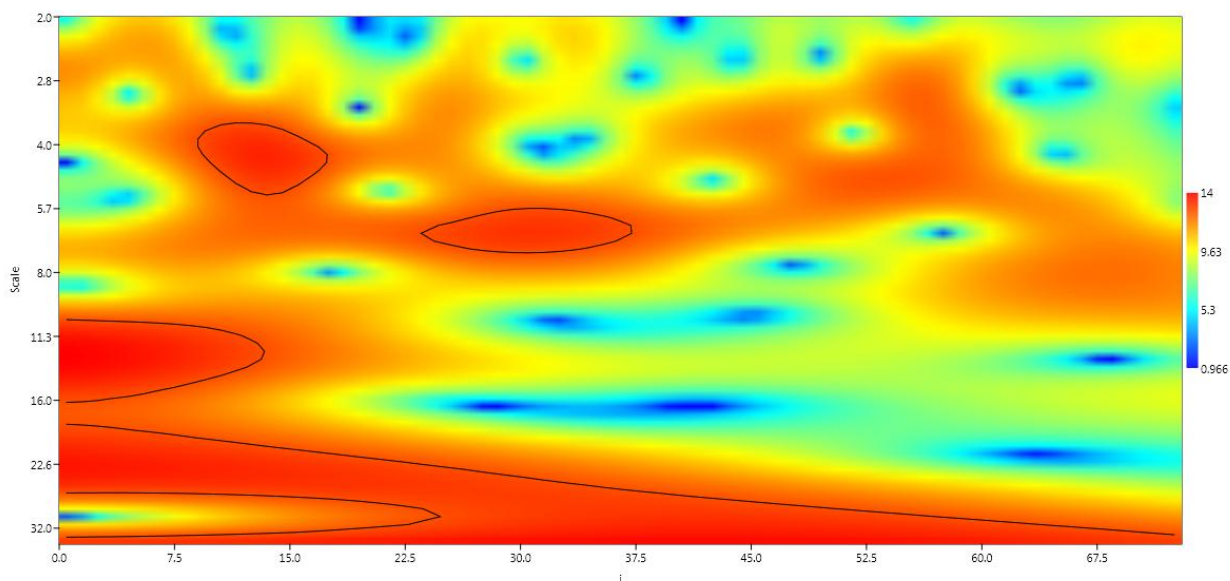


Рисунок 6. Вейвлет разложение уровня Ладожского озера

Уровень Ладожского озера был разложен путем Вейвлет анализа, для выявления скрытых составляющих. Выделить можно 30 летний Брикнеровский цикл, 11 летний цикл солнечной активности, ну и четырех и шестилетний циклы, связанные с короткопериодическим циклом колебаний температуры воздуха.

### 3.2.4 Спектральное разложение осадков над акваторией Ладожского озера

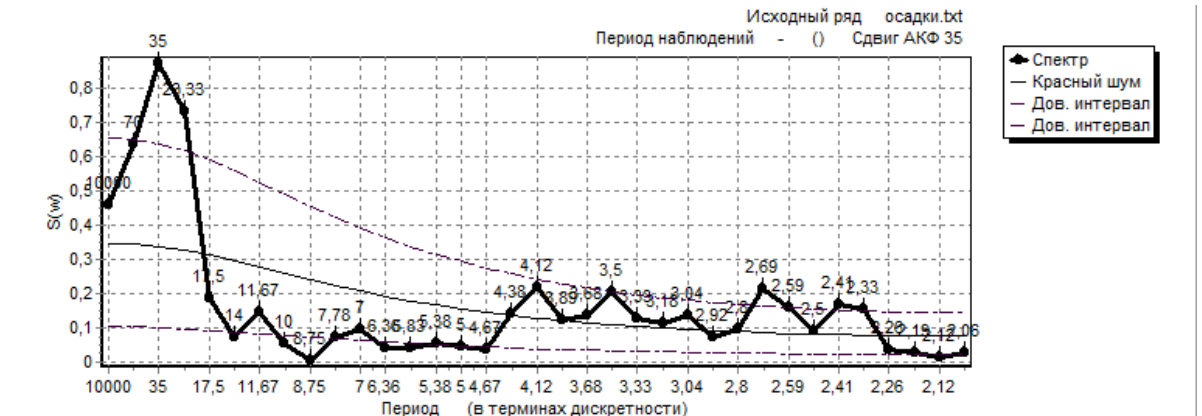


Рисунок 7. Спектральная плотность осадков над Ладожским озером.

При спектральном разложении плотности осадков над акваторией Ладожского озера были выявлены Брикнеровский цикл (35 летний), 11-летний цикл солнечной активности, и четырех и трехлетние циклы, связанные с ритмом изменения температуры воздуха в северной части Атлантического океана.

### 3.2.5 Автокорреляционная функция осадков, выпадающих над акваторией ладожского озера.

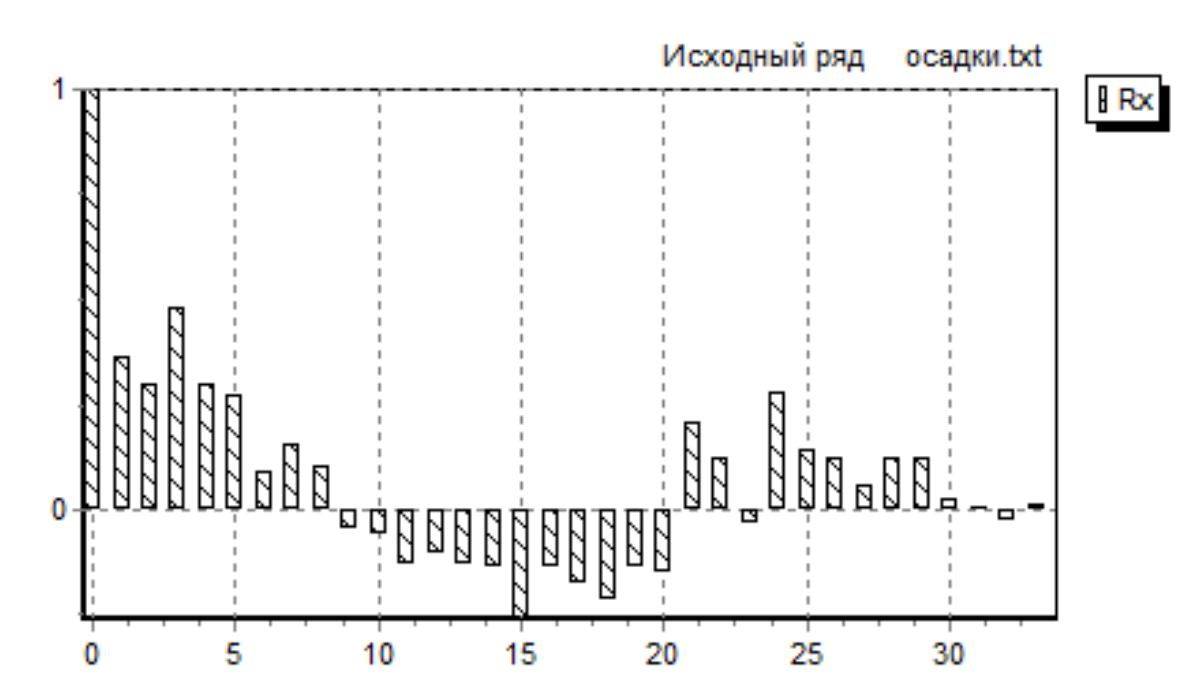


Рисунок 8. АКФ осадков над Ладожским озером.

Из графика автокорреляционной функции осадков, выпадающих над зеркалом Ладожского озера, можно говорить об инерционности процесса, так как первый сдвиг наблюдается на 9, а значит, что процесс инерционный, так же можно говорить о периодичности процесса, которая составляет 15 лет, потому процесс можно назвать квазигармоническим.



### 3.2.6 Вейвлет анализ осадков

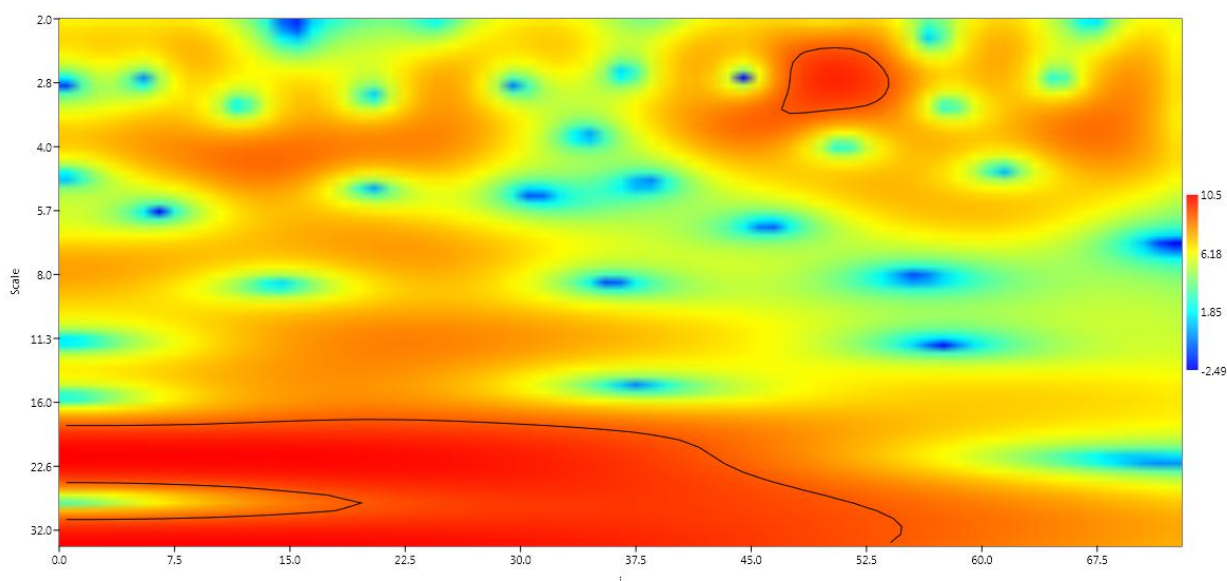


Рисунок 9. Вейвлет разложение осадков над Ладожским озером

На вейвлет разложение ряда осадков, выпадающих над ладожским озером за период с 1941 по 2021 год, можно выделить так же зоны с повышенным спектром в районе 30-это снова же вылезает Брикнеровский цикл и 3 года, который связан с ритмом изменения температуры воздуха в северной части Атлантического океана, которое может влиять на количество осадков.

### 3.2.7 Отток тепла. Спектральная плотность.

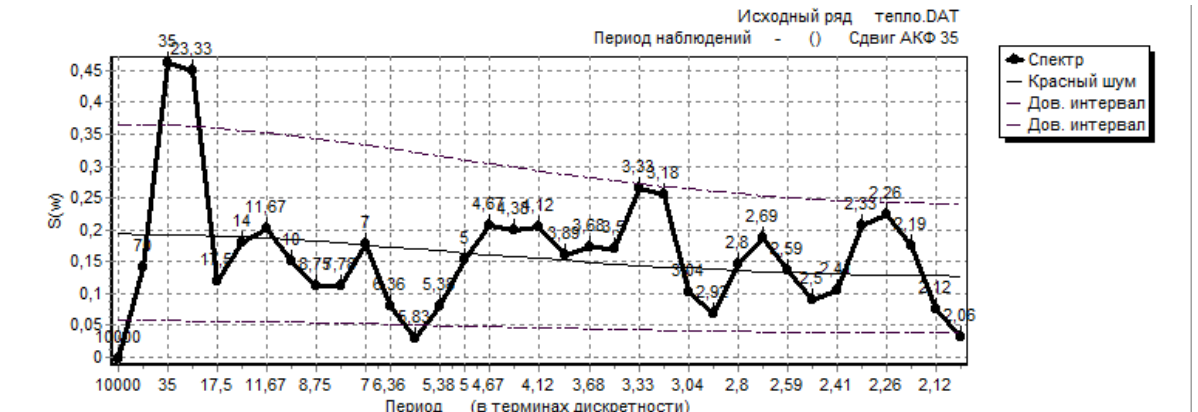


Рисунок 10. Спектральная плотность оттока тепла

Из графика спектральной плотности оттока тепла можно сделать выводы о том, что наблюдаются пики в 35 лет – Брикнеровский цикл, 11-летний цикл солнечной активности и цикл в 3 года, связанный с ритмом изменения температуры.

### 3.2.8 Автокорреляционная оттока тела за счет испарения.

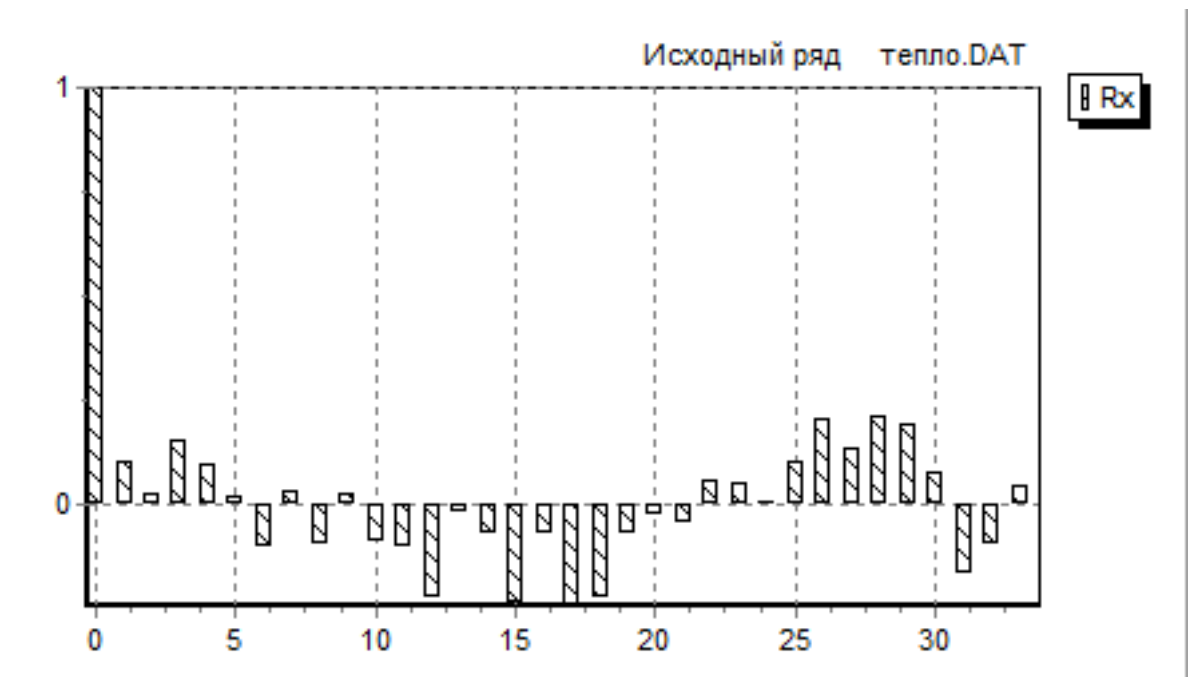


Рисунок 11. АКФ истока тепла над зеркалом Ладожского озера.

На графике автокорреляционной функции истока тепла над Ладожским озером наблюдается малая инерционность процесса и так же малая периодичность данного процесса и даже её отсутствие. Сам процесс можно охарактеризовать как абсолютно случайный процесс или «белый шум», так как единственный значимый коэффициент на периодограмме находится на значении 0 и отсутствует периодичность.

### 3.2.9 Вейвлет разложение оттока тепла за счет испарения.

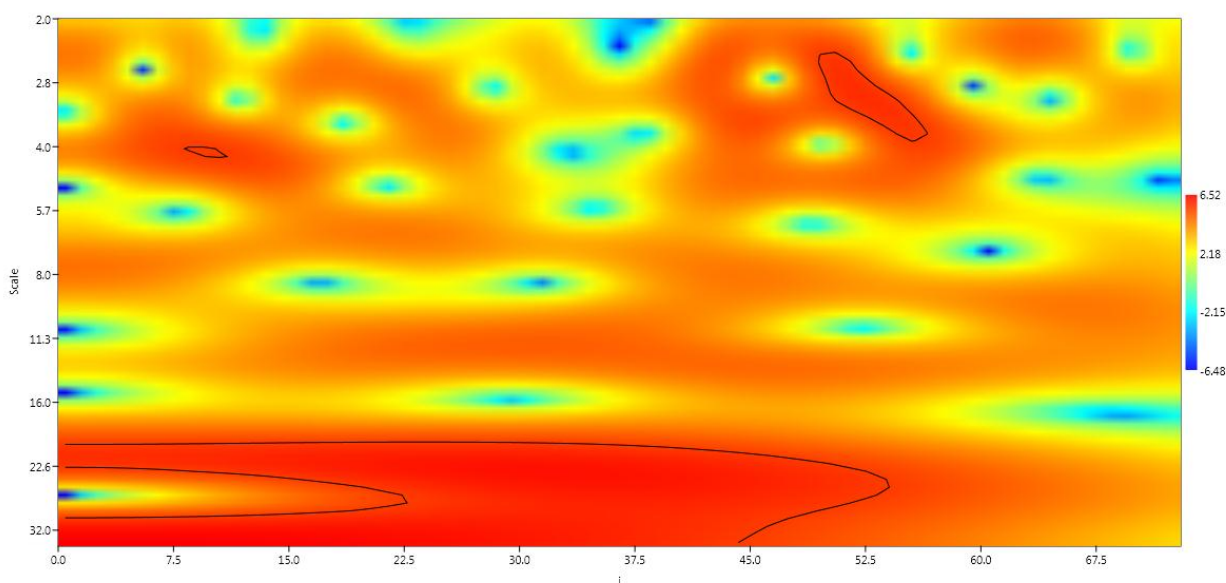


Рисунок 12. Вейвлет разложение потока тепла

На проведенном вейвлет анализе выделяется зона около 30 лет-Брикнеровский цикл и зона 3 лет, связанная с ритмом изменения температуры воздуха в северной части Атлантического океана.

Общие выводы о проведенных анализах.

Используя данные об осадках, выпадающих над Ладожским озером и испарения нельзя сделать физико-статистический прогноз для Ладожского озера, так как они не описывают его составляющих.

Компоненты, которые присутствуют в спектральной, автокорреляционной и взаимно корреляционной структуре настолько малозначимы, что опираться на какую-либо из них нельзя. Превалирующего и детерминированного ничего нет, поэтому климатический и инерционный прогноз работать не будут.

Вейвлеты подтверждают тезис о том, что осадки и испарение не являются факторами, которые определяют колебания уровня Ладожского озера. Их влияние присутствует, но не такое как в других озерах.

Обратно, можно сделать вывод о том, что осадки и испарения тесно связаны между собой, это и выявляется на вейвлет анализе, а значит, все, что выпало в форме осадков над акваторией Ладожского озера, то и испарилось и значит, что количество осадков и испарения не влияют на уровень Ладожского озера и гипотезы, выставляемые ранее о том, что можно спрогнозировать уровень за счет осадков ложны, так как все, что выпадает над акваторией, так же испаряется в том же количестве. Так же откидываются гипотезы о том, что уровень Ладожского озера зависит от осадков, выпадающих над ним.

## Глава 4.

### Прогнозирования статистическим методом.

Для прогнозирования дальнейшего развития уровня Ладожского озера был взят ряд значений за 164 года с 1859 года по 2021 год.

#### 4.1 Первичная статистика.

В программе Excel были для начала был построен ряд значений за 164 года и представлен в графическом виде.



Рисунок 13. Межгодовая изменчивость уровня Ладожского озера.

На графике, представленном на рисунке 13 отчетливо видно 2 эпохи – это эпоха высокого уровня до 1936 года и эпоха низкого уровня с 1940 года , сейчас мы находимся в эпоху пониженного уровня.

На графике межгодовой изменчивости можно сразу выделить пики максимумов и минимумов уровня. Максимум уровня составляет 637, 5 см в 1879 году, так же хотелось бы отметить другие максимумы, которые так же присутствуют на графике: 608,43 см в 1867 году, 618,07 см в 1868 году, 618,07 см в 1899 году, 632,53 см в 1900 году, 618,07 см в 1903 году, 627,71 см в 1905 году, 622,89 см в 1906 году, 632,53 см в 1924 году и 604,29 см в 1929 году.

Среднее значение уровня Ладожского озера составляет 523, 98. Значений, превышающий среднее за 164 года было 59 штук, соответственно, значений ниже среднего было 105 и можно говорить о том, что все-таки уровень Ладоги в большей мере меньше среднего или то, что это так же может быть вызвано тем, что при максимальных значениях у нас выделяются очень высокие пики максимумов в отличие от минимумов, которые не так ярко выражены.

Можно оценить и минимумы, которые видно на графике. Минимальное значение составляло 372,29 см и приходилось на 1973 год и хотелось бы так же выделить другие минимумы, которые тоже выделялись и важны для дальнейшего алитирования, это минимумы: 372,56 см. в 1940 году, 397,23 см. в 1942 году, 392,14 см. в 1974 году, 377,65 см в 2004 году и самая ближайшая на сегодняшний момент маловодная фаза-это фаза 2015 года и в этом году уровень составлял 393,62 см.

## 4.2 Спектральное разложение уровня Ладожского озера.

В дальнейшем было проведено спектральное разложение ряда уровня Ладожского озера в программе ASAP. Ниже на рисунке представлен график.

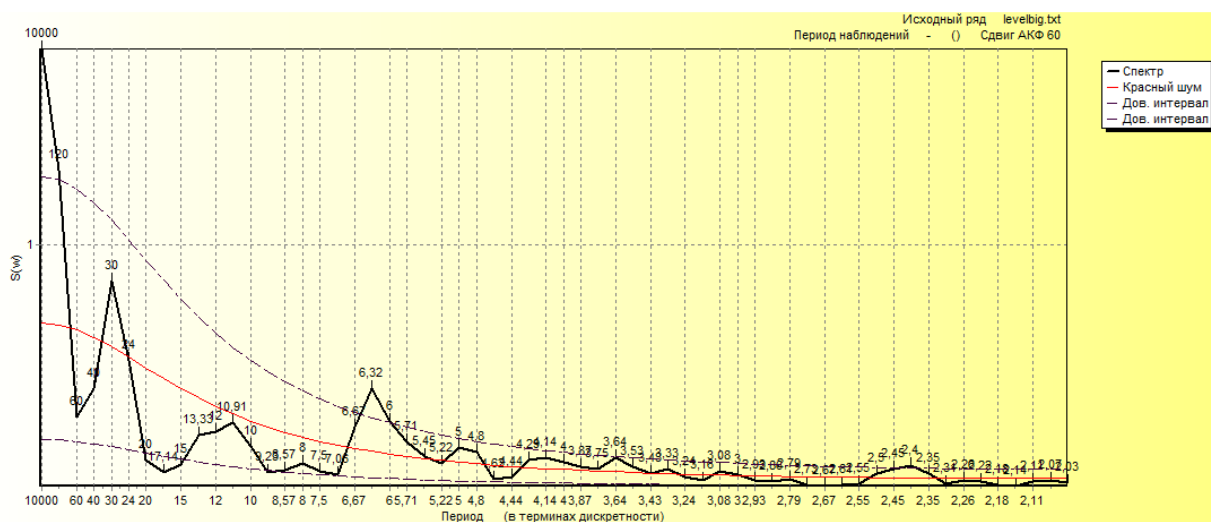


Рисунок 14. Спектральное разложение уровня Ладожского озера за 164 года.

Из графика спектрального разложения уровня Ладожского озера можно сделать выводы о присутствии в ряду циклов, тут за 64 года проявляется 30-летний Брикнеровский цикл, 11-летний цикл, связанный с изменением солнечной активности и 6-летний цикл, связанный с автоколебаниями системы океан-атмосфера.

## 4.3 Автокорреляционная функция уровня Ладожского озера.

В программе ASAP была построена автокорреляционная функция уровня Ладожского озера за 164 года с 1859 года по 2021 год.

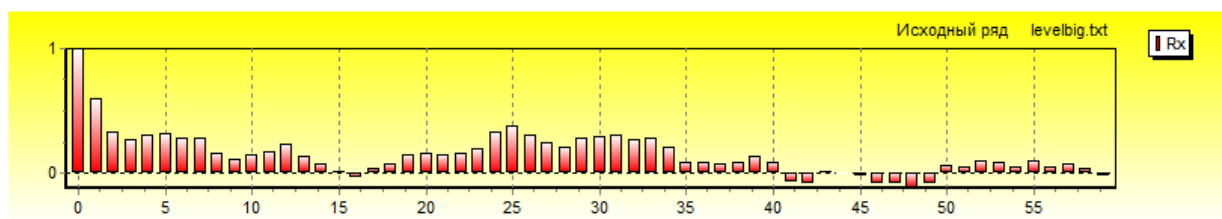


Рисунок 15. АКФ уровня Ладожского озера.

Из представленного графически автокорреляционного анализа уровня Ладожского озера можно сделать выводы об инерционности процесса по первому пересечению значение с отметкой в 0, и это пересечение происходит на значение 16, что говорит о малой инерции процесса, так же можно сделать выводы о периодической составляющей – единственный значимый пик присутствует на значении 0, что говорит об отсутствии периодичности и в общих чертах процесс межгодовой изменчивость можно охарактеризовать как «красный шум».



#### 4.4 Прогнозирование статистическим методами.

В дальнейшем было проведено прогнозирование уровня Ладожского озера в программном обеспечении ASAP.

Оптимальный шаг для прогнозирования был выбран 130, при нем достигаются максимальные заблаговременности прогноза и минимальные ошибки.

Эффективность							
Метод	Надёжность	ЗАБЛАГОВРЕ	Средн.ошиб	Дисперс.оши	Опр. ЗНАК	Опр. 0.67 Си	Опр. 0.80 Си
Факт	0	3000	0	0	100	100	100
Климат	0.9722	0	23.4115	1565.738	27.7778	55.5556	61.1111
Инерция	1.4364	0	0.2814	2313.288	61.1111	41.6667	50
Байес	1.3119	0	9.4644	2112.839	61.1111	47.2222	55.5556
Дин-Стат	1.6047	0	0.1542	2584.392	58.3333	33.3333	38.8889
Дин-Стох	1.144	0	5.9251	1842.308	61.1111	47.2222	50
АР-1	1.0227	0	9.585	1647.099	61.1111	44.4444	55.5556
АР-2	<b>0.9438</b>	<b>1.0426</b>	13.0044	1519.935	61.1111	52.7778	58.3333
АР-3	<b>0.9323</b>	0	10.9352	1501.479	50	41.6667	50
Фурье	1.1044	0	0.4486	1778.595	<b>72.2222</b>	50	58.3333
Сред.компл.	<b>0.9473</b>	0	8.1344	1525.633	63.8889	47.2222	61.1111
Регр.компл.	<b>0.7275</b>	<b>2.3091</b>	0.4053	1171.664	<b>77.7778</b>	63.8889	<b>72.2222</b>

Рисунок 16. Значения прогностических характеристик.

В таблице на рисунке представлены значения основных прогностических характеристик при различных методах прогнозирования. Из графика видно, что авторегрессия 2-го порядка дает прогноз на 1 год, а прогноз регрессионной комплексации даёт заблаговременность - это 2 года. Методы климатического прогнозирования, инерционного прогнозирования, динамически статистический и стохастический, Фурье, Байеса, авторегрессии первого и третьего порядка, и средней комплексации дают нулевую заблаговременность и не могут использоваться для дальнейшего прогнозирования.

Был выбран метод регрессионной комплексации как не только метод с максимальной заблаговременностью, так, и как метод с минимальным уровнем ошибки-она составляет 0,41, меньше только в динамически статическом.

Оправдываемость по знаку аномалии является самой большой среди всех прогнозов и составляет 77,78 %, чем она больше, тем лучше. И так же при сравнении критериев оправдываемости прогнозов: критерий краткосрочных прогнозов  $0,67\sigma$  у данного прогноза было максимальным среди всех видов прогнозирования и составлял 63,89%, критерий долгосрочного прогноза  $0,80\sigma$  тоже был максимальным среди всех и составлял 72,22%.

Межгодовая изменчивость была рассчитана по методу регрессионной комплексации и ниже представлен график значений.

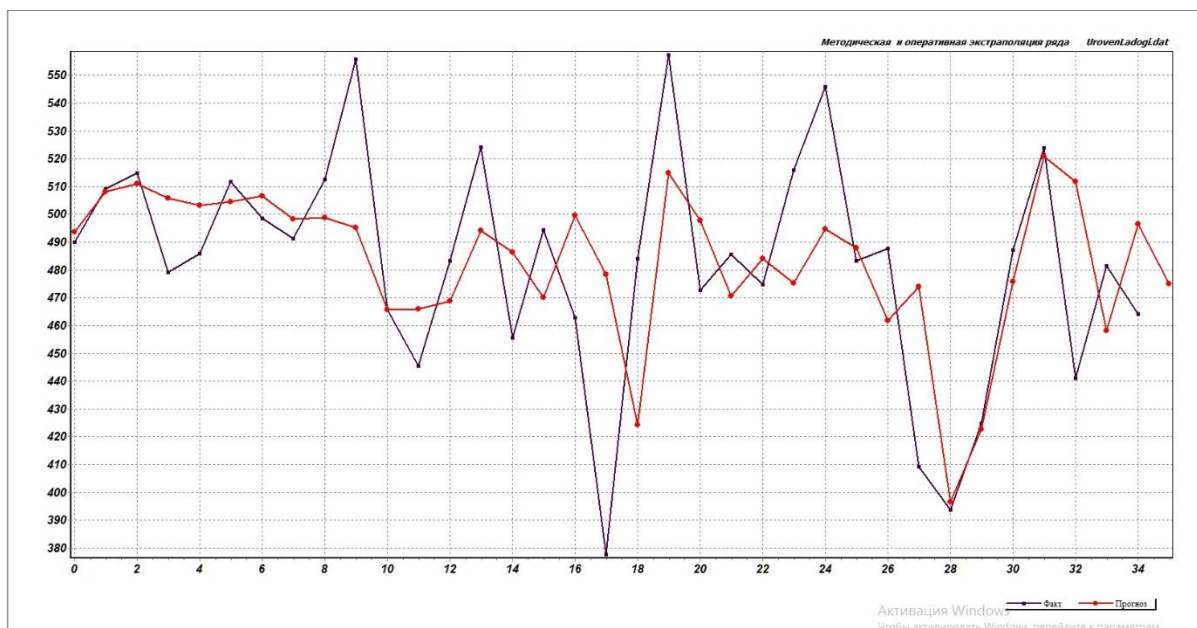


Рисунок 17. Прогноз уровня Ладожского озера методом регрессионной комплексации. (Черным цветом обозначен фактический уровень, а красным спрогнозированный).

На графике фактического и прогностического значений уровня Ладожского озера можно выявить, что прогнозом сохраняется общая тенденция развития, а так же выявляются пики максимумов и минимумов и их изменение

на протяжении времени. Не полностью продемонстрированы величины минимумов и максимумов на прогностическом варианте, в фактических же значениях они больше, но главное, что с этим прогнозом можно выявить общую тенденция и фазы водность Ладожского озера.

Вывод:

С помощью метода регрессионной комплексации ряд межгодовой изменчивости уровня Ладожского озера можно спрогнозировать на 2 года, не имея дополнительных параметров, определяющих уровень, а используя лишь сам ряд уровня. Ряд межгодовой изменчивости уровня Ладожского озера далек от случайной составляющей. Изменчивость уровня Ладожского озера обладает не стохастической структурой, так как некоторые закономерности присутствуют в ряду, но ни одна самостоятельная модель произвести их самостоятельно не в состоянии, за исключением регрессионной комплексации.

Регрессионная комплексация работает за счет матрицы значений результатов прогнозов авторегрессии 1-го, 2-ого, 3-его порядка, метода Байеса и Фурье, климатического и инерционного методов, и динамически статистического и динамически стохастического метода. Из взятого набора прогнозов строится матрица и по этой матрице строится модель регрессии и методически прогнозируется. Регрессионная комплексация является моделью описания результатов описания процессов.

Модель регрессионная комплексация по критерию долгосрочного прогноза  $0,8\sigma$  по оправдываемости превышает оправдываемость климатической модели на 11%, а оправдываемость по знаку у регрессионной комплексации 72,22 %, а у климатической 61,11% - разница 11%.

Для прогноза уровня Ладожского озера можно использовать статистические методы прогнозирования, так как использование других методов, например таких как физико-статистических не дают хороших результатов и не могут использоваться для дальнейшего прогнозирования.

## Заключение.

Получено необходимое прогнозирование уровня Ладоги на 2 года для морских перевозок, туризма, аквакультуры и других видов деятельности.

Необходимость изучения Ладоги и её межгодовой изменчивости необходима, поскольку это показатель изменений климата, тем временем как климат - важный фактор для гидрометеорологических исследований.

В данной работе были проведены исследования изменчивости уровня Ладожского озера на протяжении 164 лет и был спрогнозирован уровень на 2 года статистическим методом.

Был также проведен анализ временных рядов уровня Ладожского озера и осадков, выпадающих над ним и испарением для проверки возможности прогнозирования физико-статистическим методом.

Можно сделать следующие выводы:

1. На Ладожском озере наблюдаются циклические колебания, связанные с Брикнеровским циклом – это 30 лет, циклы солнечной активности – 11 лет и 6-ти летний цикл, который связан с автоколебаниями системы океан-атмосфера.

2. Проведенные расчеты для выявления наличия связи уровня в Ладоге и таких характеристик как осадки и отток тепла не дали положительных результатов и не могут в дальнейшем использоваться в качестве предикторов для расчета физико-статистическим методом.

3. Синхронная связь осадков и затрат тела на испарение показывает, что «осадочная» влага практически вся испаряется и уносится из региона, не успевая оказаться в акватории Ладоги.

4. Связь между уровнем Ладоги и осадками низкая. Максимальный по модулю является сдвиг осадков на 2 года (с опережением уровня) и коэффициент корреляции на этом сдвиге

составляет 0,48. Это не позволяет прогнозирование на основе физико-статистического метода, так как коэффициент корреляции не значим.

5. Дан прогноз колебаний уровня Ладожского озера с заблаговременностью 2 года методом регрессионной комплексации на единственном предикторе – самом исходном ряду.

6. Получены значения на 2022 и 2023 год. Значение на 2022 год составляет 475,10 см, а на 2023 год 491,20 см.

7. Построены спрогнозированные значения уровня Ладожского озера методом регрессионной комплексации.

8. Выявлена необходимость изучения подземного стока Ладожского озера.

## Используемая литература.

1. Бабкин А.В. Оценка колебаний и прогноз уровня Ладожского озера и стока р. Невы // материалы конференций Политехнического симпозиума. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2006, с 7
2. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Вып.1. М., 1974.
3. Гордеева С.М., Малинин В.Н. О долгосрочном прогнозе годового стока Невы и колебаний уровня Ладожского озера.// Современные проблемы в гидрометеорологии. СПб, 2006., с. 222-228.
4. Григорьев А.С., Трапезников Ю.А. Уровень Ладожского озера в условиях возможного изменения климата. // Водные ресурсы, т. 29, № 2, 2000, с. 174 –178.
5. Догановский А.М. Многолетние колебания уровня Ладожского озера. // Современные проблемы в гидрометеорологии. – СПб, 2006, с. 175 –183.
6. Догановским А.М., Мякишева Н.В. Вероятностный анализ составляющих водного баланса Ладожского озера по месячным интервалам времени (1936 –1988). // Вестн. СПбГУ. Сер. 7: Геология, география. Вып. 3 (№21), 1992, с. 75 –84.
7. Догановский А.М., Мякишева Н.В. Уровень Ладожского озера в различных диапазонах частот. Ладожское озеро. / Под ред. Н.Н. Филатова, Петрозаводск, 2000, с. 352 –358.
8. Масанова М.Д., Филатова И.В. Моделирование сезонных колебаний уровня режима Ладожского озера. // Моделирование и экспериментальные исследования гидрологических процессов в озерах. – Л.: Наука, 1986, с. 44 –48.
9. Мякишева Н.В., Трушевский В.Л. О количественной оценке регулирующей способности Ладожского озера // Вестн. Ленинград. ун-та. Сер. 7. Геология, география, 1990, вып. 1 (№ 7), с. 62 –74.
10. Никитин С.П., Филатова И.В. О возможности применения линейной регрессионной модели для расчета уровня Ладожского озера. //

- Моделирование и экспериментальные исследования гидрологических процессов в озерах. – Л.: Наука, 1986, с. 40–44.
11. Калесник С.В. Ладожское озеро.- Гидрометеоздат, 1968.
  12. Вайновский П.А., Малинин В.Н. Методы обработки и анализа океанологической информации (одномерный анализ).- Л.: ЛГМИ, 1991.
  13. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Пер. с англ.- М.: Мир, 1982. - 380 с.
  14. А. М. Догановский. Уровенный режим озер –интегральный показатель климатических и экологических изменений.
  15. Н.В. Ловелиус. Ритмика стока Невы и уровня Ладоги под действием космических факторов. Институт озероведения РАН. Санкт-Петербург.
  16. Вайновский П.А., Титов Ю.Э. Методические рекомендации по статистико-вероятностному прогнозированию океанологических характеристик. – Мурманск, ПИНРО, 1989.-136с.
  17. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Физико-статистический метод прогноза гидрологических характеристик. Мурманск.ПИНРО.2003.
  18. Филатова И.В. Изменчивость элементов водного баланса и уровня крупных озер. Ленинград 1984.
  19. Кривенко В.Г. Природные циклы Земли: прозреть перед очевидным, изменить стратегию действий. Реферат.
  20. Картеников С.Г. Ладожское озеро. Уровень воды.
  21. Чуи К. Введение в вейвлеты.2001
  22. Бабкин В.И. Оценка периодичностей и долгосрочный прогноз изменений уровней воды озер (на примере Ладожского озера и озера Веттерн). Ученые записки №9 Гидрология, 2009.