



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

Кафедра гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему

**Спектральный анализ
колебаний уровней воды
Невы и Невской губы**

Исполнитель _____ Палконен Анна Андреевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель _____ кандидат физ.-мат. Наук
(ученая степень, ученое звание)

_____ Саноцкая Надежда Александровна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

_____ 
(подпись)

_____ кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

_____ Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ г.

Санкт-Петербург
2018



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

Кафедра гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему

**Спектральный анализ
колебаний уровней воды
Невы и Невской губы**

Исполнитель _____ Палконен Анна Андреевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель _____ кандидат физ.-мат. Наук
(ученая степень, ученое звание)

_____ Саноцкая Надежда Александровна
(фамилия, имя, отчество)

**«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой**

_____ (подпись)
_____ кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

_____ Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

« ____ » _____ 20__ г.

Санкт–Петербург
2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Теоретические основы спектрального анализа.....	5
1.1 Определение спектрального анализа.....	5
1.2 Спектральный анализ в гидрологии.....	6
1.3 Спектральный анализ в пакете Statistica.....	19
2. Физико-географическая характеристика исследуемого района.....	22
2.1 Река Нева.....	22
2.2 Невская губа.....	30
3. Спектральный анализ уровней воды Невы и Невской губы.....	40
Заключение.....	45
Список используемой литературы.....	47
Приложение А Графики связи уровней воды по двум постам.....	48
Приложение Б Графики спектральной плотности по постам.....	68

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия наблюдается широкое использование аппарата теории спектрального анализа в гидрологии. Основой этого явилась идея рассмотрения фиксированных мгновенных значений гидрометеорологических процессов и пространственных полей как отдельных реализаций некоторого случайного процесса или случайного поля. Такой подход позволяет отказаться от рассмотрения особенностей отдельных мгновенных значений гидрометеорологических полей, зависимость которых от пространственных координат, а также их временной ход носят весьма сложный и запутанный характер, и перейти к рассмотрению некоторых осредненных свойств статистической совокупности их реализации, отвечающей некоторой совокупности фиксированных внешних условий.

Уровень воды можно рассматривать как случайный процесс. В выпускной квалификационной работе в качестве исходных данных использовались ежедневные уровни Невы и Невской губы (наблюдения в 9 и 21 ч.). В 2011 г. построен Комплекс защитных сооружений (КЗС) г. Санкт-Петербурга. Следовательно, возможны изменения колебаний уровней воды Невы и Невской губы и этот вопрос требует дополнительных исследований.

Таким образом, вопросы спектрального анализа уровней воды Невы и Невской губы являются актуальными с научно-технической и прикладной точек зрения.

Целью выпускной квалификационной работы является исследование колебаний уровней воды Невы и Невской губы с помощью спектрального анализа.

Объектом исследований выступают уровни воды, а предметом исследований являются методы спектрального анализа.

Для достижения цели исследований были поставлены следующие частные задачи:

- а. Анализ теоретических основ спектрального анализа.

б. Спектральный анализ уровней воды Невы и Невской губы.

с. Выработка предложений по практическому использованию полученных результатов.

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследований.

В первом разделе рассматриваются теоретические основы метода спектрального анализа гидрологических процессов.

Во втором разделе приводится физико-географическое описание района исследований.

В третьем разделе представлены результаты спектрального анализа уровней воды р. Нева и Невской губы.

В заключении сформулированы основные результаты работы, полученные в рамках выпускной квалификационной работы, показана их практическая значимость.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

1.1 Определение спектрального анализа

Мощным инструментом обработки данных, определённых дискретной зависимостью $y(x_i)$ или непрерывной функцией $f(x)$, является спектральный анализ, имеющий в своей основе различные интегральные преобразования. Спектром совокупности данных $y(x)$ называют некоторую функцию другой координаты $F(\omega)$, полученную в соответствии с определённым алгоритмом.

Спектральный анализ заключается в разложении реализаций во времени исследуемого явления на различные частотные составляющие (спектр), показывающие вклад колебаний с разными частотами в общую энергию процесса. Спектр показывает периоды преобладающих колебаний. Основываясь на этой информации можно предсказать устойчивость и неустойчивость соответствующих волн.

Задачами, непосредственно связанными со спектральным анализом, являются проблемы сглаживания и фильтрации данных. Они заключаются в построении из исходной экспериментальной зависимости $y(x_i)$ некоторой (непрерывной или дискретной) зависимости $f(x)$, которая должна приблизить её, учитывая к тому же, что данные (x_i, y_i) получены с некоторой погрешностью, выражающей шумовую компоненту измерений. При этом функция $f(x)$ с помощью того или иного алгоритма уменьшает погрешность, присутствующую в данных (x_i, y_i) . Такого типа задачи называются задачами фильтрации. Сглаживание путём построения регрессии данных – это частный случай фильтрации.

С точки зрения спектрального анализа наиболее важной характеристикой случайного процесса является спектральная плотность мощности.

Рассмотрим случайный стационарный процесс $X(t)$ с $m_x = 0$ обладающий эргодическим свойством. Для этого случая спектральную плотность мощности можно определить так:

$$G_x(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T \Delta f} \int_0^T x^2(t, f, \Delta f) dt.$$

Строгими определениями спектральной плотности мощности могут в равной мере служить соотношения

$$G_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} M[|A_T(f)|^2]$$

$$G_x(f) = 4 \int_0^{\infty} k_x(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau$$

где

$$A_T(f) = \int_0^T x(t) e^{-i2\pi f t} dt$$

$K_x(\tau)$ – корреляционная функция стационарного случайного процесса.

1.2 Спектральный анализ в гидрологии

Гидрологический цикл представляет собой завершённый процесс обращения и перераспределения воды атмосферой и сушей. Этот процесс непрерывно изменяет баланс между водами суши и атмосферной влагой.

Можно выделить три подхода к построению моделей гидрологических явлений.

а) При первом подходе профессиональный опыт и логическая интерпретация явления могут быть воплощены в приемлемую схему (детерминистическую или вероятностную) путем чисто умозрительных соображений, включающих индуктивные и дедуктивные рассуждения.

б) Второй, более прагматический подход к моделированию – приспособить удобную математическую модель, почти или вообще не пытаясь обосновать ее выбор на основе информации о физическом процессе. Целью является эмпирическое описание явления, такой подход может оказаться вполне удовлетворительным и ценным для принятия решений.

с) Третий подход является наиболее ценным при построении математических моделей гидрологических временных рядов. Наблюденные данные обрабатываются непосредственно для того, чтобы получить эффективные оценки спектральных представлений (спектр дисперсии) или моментальных функций (коррелограмм) стохастических процессов. При отсутствии достаточных сведений о наблюдаемых физических явлениях или теории стохастических процессов, необходимой для моделирования этих явлений, спектральный анализ вторых моментных функций дает информацию о главных источниках изменчивости явлений. Он позволяет выделить тренды периодические составляющие и инерционные связи внутри отдельного временного ряда или между временными рядами для нескольких станций.

Модели могут содержать два типа ошибок. В первом случае анализ охватывает недостаточное число переменных. Некоторые из не учитываемых переменных могут обеспечивать большой процент систематической изменчивости в зависимой переменной. Во втором случае параметры модели изменяются случайным или систематическим образом. Если случайным, то их анализ должен проводиться в соответствии со статистической теорией выборок. Если систематическим, то более точные прогнозы могут быть обеспечены улучшенным планированием эксперимента или более тщательным контролем.

Как следствие, важной особенностью теоретических моделей в гидрологии является их неоднозначность; важной задачей моделирования является анализ устойчивости решений. Оценка моделей может быть количественной (объективной), качественной (субъективной) или статистической. В первом случае достаточным является простое сравнение прогноза и действительности. Когда данные являются неадекватными, оценка моделей затрудняется и становится субъективной, как, например, в случае нелинейной регрессионной модели максимального стока как функции физико-географических характеристик бассейна.

1.2.1 Природа гидрологических временных рядов

Процесс – это любое явление, которое непрерывно изменяется во времени, в некоторой области, в каком-либо объеме или вдоль линии. Поскольку изменения и в пространстве, и во времени являются характерной особенностью большинства гидрологических явлений, можно говорить о гидрологических процессах.

Дождевые осадки и сток изменяются во времени и по площади водосбора, что аналогичным образом меняются скорости инфильтрации и инфильтрационная способность почвы, что процесс эрозии не является одинаковым по всему бассейну, что распределение консервативных и неконсервативных диффузатов (трассеров и загрязняющих веществ) в текущем объеме (атмосфере, водотоке или земле) не только является неоднородным, но также зависит от времени, и что ширина и площадь поперечного сечения потока меняются во времени и с расстоянием.

Гидрологический процесс протекает в динамической системе, и это должно учитываться при построении математических моделей.

Гидрологический процесс разворачивается во времени в виде определенной последовательности событий, как, например, на гидрографах паводков или графиках дождевых осадков. Получающиеся временные ряды могут быть дискретными или непрерывными. Непрерывная запись расходов воды за несколько лет является непрерывным временным рядом в самом настоящем смысле, тогда как непрерывная запись, искусственно трансформированная в некоторую последовательность средних суточных, средних месячных или средних годовых значений стока является дискретным временным рядом. Предполагается, что средние значения стока отмечаются мгновенно в дискретные моменты времени. Событиями в природе, которые проявляются приблизительно в дискретные моменты времени, являются меженный сток в реке, мгновенные максимальные расходы воды (паводки), периоды отсутствия притока или оттока воды из водохранилища и периоды

без дождя. При построении математических моделей гидрологического процесса важным является определение временного масштаба.

События, которые составляют гидрологический временной ряд, можно анализировать согласно рангу величины события и согласно последовательности появления событий. При ранжировании гидрологических событий пренебрегают порядком их появления. Ранжирование образует основу традиционных методов частотного анализа, который хорошо изложен Чоу. Эти методы предполагают применимость к гидрологическим явлениям классической теории вероятности независимых событий. Получающиеся кривые повторяемости расходов, эмпирические графики обеспеченности и функции используют, чтобы предсказать как величину расхода воды или осадков, так и среднее число случаев, в которых заданная величина расхода воды или осадков будет достигнута или превышена в будущем.

В отличие от ранжирования, при исследовании последовательности появлений событий предполагается, что прошлые события из данного временного ряда могут влиять на величину текущих или будущих событий в том же самом ряду или в некотором другом временном ряду. Таким образом, допускается связь или зависимость между последовательными (сопряженными) значениями одного и того же временного ряда (сопряженных временных рядов). При предсказании величин и частоты появления данных событий с помощью традиционных методов связью, которая может существовать между последовательными значениями гидрологического временного ряда, обычно пренебрегают.

1.2.2 Однородность во времени и пространстве

Гидрологический временной ряд в некоторой точке пространства представляет выборку из совокупности всех возможных значений явления. Все события в этом ряду должны быть одинакового сорта. Ряд является однородным во времени, если каждое событие во все времена имеет

одинаковую вероятность появления. Неоднородность во времени в отдельной точке может быть вызвана природой, квазиприродной или человеческой деятельностью.

Типы естественных изменений включают тренд, периодичность, инерционность и катастрофические события (землетрясения, оползни). Примерами квазиприродных изменений является сдвиг кривых расходов воды на гидрометрической станции в результате деформации русла, изменение распределения осадков в окрестностях дождемеров под влиянием деревьев или строений либо изменение температуры в некоторой точке вследствие меняющихся теневых условий.

Искусственные изменения включают увеличение потерь на испарение, изменение стока и уровней грунтовых вод под влиянием плотин, изменение гидрологических условий вследствие высыхания плавней и болот, увеличение суммарного испарения и эрозии в результате мероприятий по регулированию стока и сельскохозяйственной деятельности человека, изменение метеорологических условий вследствие загрязнения воздуха. Деятельность человека все в большей мере нарушает однородность гидрологических (или климатических) данных в таких больших географических районах, что эти изменения едва отличимы от естественных климатических измерений.

Пространственная однородность гидрологических временных рядов существует в статистическом смысле, когда два или больше временных ряда обладают незначительно различающимися статистическими параметрами, т. е. каждый временной ряд извлечен из одной и той же совокупности. Очевидно, два осадкомера, расположенные на различных уровнях на склоне горы, принесут данные из двух различных метеорологических совокупностей. С другой стороны, два осадкомера, расположенные лишь в нескольких футах друг от друга, дадут сходные временные ряды, которые являются пространственно зависимыми; при вычислении средней величины осадков в бассейне оба самописца следовало бы рассматривать как один

самописец. Поэтому для оценки статистической гидрологической однородности (стока или осадков) следует применять пространственно независимые станции.

1.2.3 Детерминированные и стохастические процессы

Внутренняя изменчивость гидрологических процессов может быть детерминированной или стохастической. В детерминированном процессе между гидрологической переменной и временем существует определенное соотношение, как в уравнениях трансформирования паводка и мгновенного единичного гидрографа. Функциональное уравнение определяет процесс в течение всего времени его существования; каждое последующее наблюдение явления во времени не дает новой информации о процессе. В этом состоит отличие детерминированного процесса от стохастического, который полностью или частично развивается по случайному закону.

Процесс может быть чисто случайным и квазислучайным. Вероятностный закон, согласно которому переменная $x(t_i)$ принимает свое значение в момент t_i , может быть независимым (вероятностный закон не меняется во времени) или зависимым от времени. Если процесс является квазислучайным, значения x_1, x_2, \dots, x_n являются зависимыми и связанными между собой. Получающаяся неслучайная временная последовательность не флуктуирует так же быстро, как случайная временная последовательность вследствие регулярности, вносимой стохастической зависимостью (в некотором смысле детерминированным режимом). В природе возможен спектр различных процессов – от чисто детерминированного процесса до чисто случайного. Стохастический процесс является более сложным, чем его детерминированный аналог – функция и его одномерный аналог – случайная переменная. Стохастический процесс развивается во времени под контролем вероятностных законов.

В инженерной гидрологии интересует динамическая реакция бассейна на стохастическую вынуждающую функцию в некоторые моменты времени. Вероятности больших пиков входного сигнала, усиливающих или

уменьшающих взаимное влияние на реакцию бассейна, зависит от степени корреляции между входными случайными переменными, которые имеют многомерную функцию совместного распределения. Реакция бассейна также хорошо может быть описана исходя из ее собственной функции совместного распределения. На практике можно принять общую модель n -мерного распределения, например многомерное нормальное распределение и найти параметры, необходимые для описания этого распределения в виде функций времени. Для многомерного нормального распределения такими параметрами являются функция среднего значения, дисперсия и ковариационное ядро. Часто единственной доступной информацией о стохастическом процессе является его функция среднего значения, дисперсия и ковариация.

Ковариационное ядро описывает степень, или «силу», корреляции (или зависимости) между значениями процесса в любые два момента времени s и t .

Нормированное корреляционное ядро является мерой линейной предсказуемости (стохастической зависимости) одного значения x_t процесса в момент t по другому заданному значению x_s процесса в момент s .

В случае стационарного временного ряда вероятностный закон является инвариантным относительно сдвигов временной оси. Среднее значение, дисперсия и одномерная функция распределения $F(x)$ процесса функционально не зависят от времени. Из этого процесса может быть получено бесконечное число выборочных функций. Если бы было возможно сделать n -кратную выборку расходов воды на гигрометрической станции в течение одного и того же 50-летнего периода, то для анализа были бы доступны N различных временных рядов (называемых выборками для конечного временного ряда). Если процесс является стационарным, каждая такая выборка имеет равную вероятность появления. Проверить ряд на стационарность в строгом смысле очень трудно. На практике, однако, желаемую простоту анализа обеспечивает стационарность ковариации, или

стационарность в широком смысле. Производя умножение сопряженных значений сдвинутого и несдвинутого временных рядов, например $x(t_i) \cdot x(s_i)$, получаем искомую автокорреляционную функцию.

Считается, что большинство гидрологических временных рядов являются нестационарными квазислучайными последовательностями. Поэтому среднее значение и дисперсия изменяются со временем, функция распределения зависит от времени, а значения x_i временного ряда обычно являются взаимосвязанными. Эти осложнения связаны с такими факторами, как антропогенная деятельность на водосборе, катастрофические события, изменение метеорологических условий и эрозионные процессы. Степень корреляции внутри этой последовательности зависит от временного интервала, на котором строится временной ряд. Для средних суточных расходов отмечается высокая степень внутренней зависимости, для средних месячных расходов такая зависимость выражена меньше и еще меньше для средних годовых расходов. При сглаживании высокочастотных флуктуаций путем арифметического осреднения на все более длинных отрезках времени сглаженный временной ряд обнаруживает все меньшую и меньшую изменчивость (дисперсию) и ковариацию. Годы значительной водности имеют тенденцию группироваться с годами так же высокой водности, а засушливые годы – с засушливыми в большей мере, чем в последовательности случайных чисел.

Гидрологические явления изменяются не только во времени, но и в пространстве. Каждый выборочный временной ряд, полученный в этом районе, совершенно подобен соседнему временному ряду, если окружающие условия не меняются во времени и в пространстве.

1.2.4 Причинность и случайность

Любая модель, будь она эмпирического или теоретического происхождения, является лишь аппроксимацией природного процесса. Природа не может быть втиснута в жесткие теоретические рамки. Опыт

показывает, что стохастические модели дают более-менее реалистическое представление о процессе осадки – сток.

Детерминированный подход постулирует, что главные источники изменчивости известны априори, тогда как стохастический подход предполагает характерное изменение процесса около функции среднего значения, т.е. детерминированной компоненты. Таким образом, детерминированный процесс является вырожденным случаем стохастического процесса, в котором ошибка прогноза равна нулю; поэтому при таком процессе информация о прошлом является достаточной, чтобы предсказать будущее.

Случайный режим на микроскопическом, или индивидуальном, уровне может привести к упорядоченному режиму на макроскопическом, или коллективном, уровне, а упорядоченный индивидуальный режим может вылиться в случайную коллективную форму. Более того, случайность имеет свои собственные законы. Совершенная случайность, по-видимому, является такой же абстракцией, как совершенная причинность, и все же ни та, ни другая не мыслится по отдельности. Между полной случайностью и строгой причинностью лежит континуум степеней корреляции. Как при детерминистическом, так и при стохастическом подходе полезность метода определяется в конечном итоге его способностью дать приемлемые инженерные прогнозы и решения. Ни один из подходов не в состоянии дать прогноз будущего хода событий с полной определенностью. Пути к достижению поставленных целей при обоих подходах неодинаковы. Становится все более очевидным, что стохастический подход отвечает на вопросы, на которые не давали ответа традиционные методы. Рассмотрим, например, динамическую реакцию бассейновой системы на последовательность входных сигналов – осадков. Детерминированные методы обычно ограничиваются вычислением временного хода реакции (гидрограф стока на гидрометрической станции) на идеализированную серию ливней (однородный дождь). Теоретические модели мгновенного единичного

гидрографа предполагают мгновенное выпадение осадков над всем бассейном. В отличие от этого, стохастическая модель входного сигнала при заданных определенных состояниях увлажненности бассейна даст гидрологу надежду прийти к совершенно общим заключениям в отношении вероятности появления любой величины максимальной реакции водосбора на любые входные сигналы-осадки.

1.2.5 Обобщенный гармонический анализ

Спектральный анализ записи данных аналогичен разложению естественного света в радугу (спектр), которое происходит, когда белый свет пропускается через призму. Если источником света является искусственный, светящийся за счет температурного излучения элемента, спектр состоит из конечного числа ярких линий различной интенсивности (энергии).

Распространение такой концепции на переходные и случайные функции приводит к понятию непрерывного спектра частот вместо дискретного линейчатого спектра. Однако анализируемая характеристика эмпирического или теоретического сигнала – это не его амплитуда, а его дисперсия. Дисперсия является мерой рассеяния наблюдений около некоторого среднего значения; в определенном смысле она дает среднюю «интенсивность» флуктуации явления около статистически устойчивого среднего значения. Суммарную дисперсию в отдельной записи разлагают, чтобы найти частотные полосы (периоды), на которых дисперсионный вклад является статистически значимым. Получающийся спектр дисперсии является выборочным спектром, интерпретация которого позволяет лучше понять физику производящего процесса. Понятие спектра дисперсии введено для того, чтобы оценить характер неслучайности в серии данных способом, который предполагает минимальные априорные сведения, если таковые вообще имеются, об этой неслучайности, трендах или даже колебаниях, которые могли бы присутствовать. Затем производящие процессы постулируются на основе этих косвенных свидетельств, соединенных с

приемлемым толкованием физики гидрологической системы. Эти модели используются для имитации гидрологического процесса, чтобы облегчить прогноз средних и экстремальных условий в гидрологии.

1.2.6 Периодические временные ряды.

Классический гармонический анализ представляет собой разложение колебательных периодических, квазипериодических и переходных процессов в бесконечный ряд синусоид с различными частотами или периодами. Его цель – отыскать детерминистические регулярности и, наоборот, ресинтезировать исходное явление.

Эмпирический или теоретический временной ряд $x(t)$ может быть разложен в ряд Фурье согласно следующей формуле:

$$x(t) = \frac{a_{x0}}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_{xn} \cos 2\pi n f_1 t + b_{xn} \sin 2\pi n f_1 t) \quad (1)$$

где $f_1 = T_1^{-1}$ – основная круговая частота, обратная основному периоду T_1 и связанная с основной угловой частотой ω_1 соотношением $f_1 = \omega_1 / (2\pi)$; n – целое число, характеризующее порядок гармоники; a_{xn} и b_{xn} – гармонические коэффициенты и $a_{x0}/2$ – среднее значение ряда $x(t)$.

Уравнение (1) можно записать также в виде

$$x(t) = \frac{a_{x0}}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} c_{xn} \cos(2\pi n f_1 t - \theta_{xn}) \quad (2)$$

где $c_{xn} = (a_{xn}^2 + b_{xn}^2)^{\frac{1}{2}}$ – амплитуда и $\theta_{xn} = \text{tg}^{-1} \left(-\frac{b_{xn}}{a_{xn}} \right)$ – фазовый угол.

Уравнение (2) показывает, что сложные периодические данные состоят из некоторой стационарной средней составляющей $a_{x0}/2$ и бесконечного

числа синусоидальных компонентов (гармоник), которые имеют амплитуды c_{xn} и фазы θ_{xn} .

Для последующих обобщений удобно следующее представление во временной области в виде комплексный экспонент, приводимое Ли:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_x(n) \exp(jn\omega_1 t) dt \quad (3)$$

где $j = \sqrt{-1}$, $F_x(n) = \frac{1}{2}(a_{xn} - jb_{xn})$ есть комплексный спектр амплитуд периодической функции $x(t)$, а также преобразование Фурье от $x(t)$

$$F_x(n) = T_1^{-1} \int_{-T_1/2}^{T_1/2} x(t) \exp(-jn\omega_1 t) dt.$$

Последнее является представлением $x(t)$ в частотной области и дает дискретный линейчатый спектр.

Если бы форма временного ряда была такой же, как у точно периодической функции (синусоидальная волна), то полная флуктуация ряда заключалась бы в одной гармонике (например, в одном синусном и одном косинусном члене, период которого соответствует исходной функции). С другой стороны, когда форма функции не является синусоидальной, то для аппроксимации этой функции требуется по меньшей мере две и по большей мере $N/2$ гармоник (где N есть общее число интервалов квантования на периоде T_1).

В отношении реальных гидрологических временных рядов понятия частоты и периода являются абстракцией, а представление этих рядов в виде суммы тригонометрических членов является математическим трюком.

Кросс-корреляционная функция $R_{xy}(\bar{t})$ имеет вид

$$R_{xy}(\bar{t}) = T_1^{-1} \int_0^{T_1} x(t)y(t + \bar{t})dt = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [\bar{F}_x(n)F_y(n)] \exp(jn2\pi f_1 \bar{t}),$$

где $\bar{F}_x(n)$ – комплексная функция, сопряженная с $F_x(n)$, а $F_y(n)$ – комплексный спектр амплитуд ряда $y(t)$. Преобразование Фурье от $R_{xy}(\bar{t})$ есть кросс-энергетическая спектральная функция

$$S_{xy}(n) = \bar{F}_x(n)F_y(n) = T_1^{-1} \int_0^{T_1} R_{xy}(\bar{t}) \exp(-jn2\pi f_1 \bar{t}) d\bar{t}.$$

Кросс-корреляционная функция, записанная с помощью исходных гармонических коэффициентов ряда Фурье для $x(t)$ и $y(t)$, имеет вид

$$R_{xy}(\bar{t}) = \frac{a_{x0}a_{y0}}{4} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} c_{xn} c_{yn} \cos(n2\pi f_1 \bar{t} + \theta_y - \theta_{xn}),$$

где $c_{xn} = (a_{xn}^2 + b_{xn}^2)^{1/2}$, $c_{yn} = (a_{yn}^2 + b_{yn}^2)^{1/2}$.

Кросс-спектральная функция имеет вид

$$S_{xy}(n) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} c_{xn} c_{yn} [\cos(\theta_{yn} - \theta_{xn}) + j \sin(\theta_{yn} - \theta_{xn})]$$

Каждая реализация случайного процесса обладает автокорреляционной функцией, тождественно равной автокорреляционной функции по ансамблю:

Основное назначение автокорреляционных функций – выделить влияние значений выборки в любой момент времени на значения той же выборки в некоторый будущий момент. При большом временном сдвиге детерминированная синусоидальная волна сохраняется, в то время как влияние белого шума равно нулю. С другой стороны, основное назначение функции спектральной плотности мощности – установить частотный состав данных, что в свою очередь связано с основными свойствами физической системы.

Кросс-корреляционная функция $R_{xy}(\bar{t})$ двух последовательностей случайных данных определяет линейную зависимость значений одной последовательности от значений другой. Функция определяется уравнением

$$R_{xy}(\bar{t}) = \lim_{T \rightarrow \infty} T^{-1} \int_0^T (x(t)y(t + \bar{t})) dt$$

и всегда является вещественной функцией, которая может быть положительной или отрицательной.

Кросс-спектр мощности позволяет оценить корреляции между низкочастотными и высокочастотными составляющими двух временных рядов.

Так как кросс-корреляционная функция нечетная, $G_{xy}(f)$ обычно является комплексной величиной:

$$G_{xy}(f) = C_{xy}(f) - jQ_{xy}(f),$$

причем вещественная часть $G_{xy}(f)$ называется функцией коспектральной плотности, а мнимая часть $Q_{xy}(f)$ – функцией квадратурной спектральной плотности.

1.3 Спектральный анализ в пакете Statistica

STATISTICA – универсальный статистический пакет, содержащий множество современных статистических методик. Имеется отдельный модуль анализа временных рядов с широким набором возможностей. Модуль Временные ряды включает полную реализацию методов спектрального или Фурье анализа одного ряда и кросс-спектральный анализ двух рядов. Преимущества реализации спектрального анализа в STATISTICA проявляются при анализе очень длинных временных рядов и не предполагают каких-либо ограничений на длину ряда (в частности, длина исходного ряда не обязана быть четной). Стандартные методы предварительной обработки ряда включают косинус-сглаживание, вычитание среднего и удаление тренда.

Результаты обычного спектрального анализа содержат: частоту и период колебаний, коэффициенты при синусах и косинусах, периодограмму и оценку спектральной плотности. Оценка плотности может быть вычислена с помощью весов Даниеля, Хэмминга, Бартлетта, Тьюки, Парзена или с весами и шириной, заданными пользователем. Очень полезна, особенно при работе с длинными рядами, возможность выводить в убывающем порядке

заранее заданное число точек периодограммы или спектральной плотности; таким образом можно обнаружить резкие пики периодограммы и спектральной плотности для длинных рядов.

Для представления результатов анализа имеются различные типы графиков; можно отобразить коэффициенты при синусах и косинусах, периодограмму, лог-периодограмму, спектральную и лог-спектральную плотность по отношению к частотам, периодам и лог-периодам. В случае длинного исходного ряда имеется возможность выбрать конкретный сегмент (период), для которого будут изображаться соответствующие периодограмма и график спектральной плотности, тем самым будет улучшено их «разрешение». Отметим, что для преобразования Фурье разработан очень эффективный алгоритм, называемый БПФ – быстрое преобразование Фурье. При использовании БПФ, аргумент прямого Фурье-преобразования, т.е. вектор y , должен иметь ровно $2n$ элементов (n – целое число). Результатом является вектор с $1 + 2n - 1$ элементами. Если число данных не совпадает со степенью 2, то необходимо дополнить недостающие элементы нулями. В случае обратного преобразования, если аргумент является N - компонентным вектором, где $N = 1 + 2n$, то в результате получается в два раза больший вектор из $2(N - 1) = 2n + 1$ компонент.

Целью спектрального анализа является разложение исходного ряда \sin - и \cos -функции с различными частотами и выделение самых важных колебаний. Эта задача относится к сфере линейной множественной регрессии (Multiple Regression problem), где зависимая переменная – экспериментальный временной ряд, а независимые переменные или регрессоры – \sin -функции всех возможных (дискретных) частот. Такая модель линейной множественной регрессии записывается как:

$$x_t = a_0 + \sum_{k=1}^q [a_k \cos(\lambda_k t) + b_k \sin(\lambda_k t)]$$

где λ – частота в радианах на единицу времени: $\lambda = 2\pi\nu_k$, где $\pi=3.1415\dots$ и $\nu_k = \frac{k}{q}$, ν – частота, цикло циклов за единицу времени, период $T = \frac{1}{\nu}$.

Здесь параметры $\cos(a_k)$ и $\sin(b_k)$ – коэффициенты регрессии, указывающие на степень, с которой соответствующие функции коррелируют с данными. Очевидно, что тригонометрических функций, q , не может быть больше, чем число данных. Если в массиве N точек, то Cos-функций будет $N/2 + 1$, а Sin-функций $N/2 - 1$, т.е. тригонометрических функций, столько же, сколько точек в массиве. Если количество данных в ряде нечетно, то последнее наблюдение обычно опускается.

Периодограмма – графическое изображение оценки модуля преобразования Фурье автокорреляционной функции стационарного временного ряда или случайного процесса. Это – графическая форма оценки спектра функции автокорреляции. Ее еще можно рассматривать как график зависимости мощности процесса (или, что тоже, квадрата амплитуды) от частоты. При анализе периодограммы нужно обращать особое внимание на ее пики. Большой пик в области некоторой частоты ω_0 указывает на то, что в спектральном разложении автокорреляционной функции присутствует соответствующая гармоническая компонента. Чем выше и резче выделен пик, тем большая часть мощности сосредоточена около частоты ω_0 и тем большую роль играет эта частота в описании соответствующего случайного процесса или временного ряда.

2 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМОГО РАЙОНА

2.1 Река Нева

Река Нева представляет короткий проток, соединяющий Ладожское оз. с Финским заливом. Нева вытекает из Шлиссельбургской губы Ладожского озера двумя рукавами, огибая остров Орешек.

Общая длина реки 74 км. Ширина реки составляет от 400 до 600 м, наибольшая ширина – 1250 м (на Ивановских порогах). Средняя глубина в пределах 8-11 м, а наибольшая – 24 м.

Нева течет по плоской, широкой, заболоченной долине. Берега реки почти на всем протяжении круто обрываются к воде. Четко выраженная корытообразная форма русла реки очень удобна для судоходства. Нева не имеет поймы, которая бы заливалась в весеннее половодье.

Ложе Невы сложено песчаными грунтами, под ними находятся глинистые и суглинистые грунты, ниже залегает плотная кембрийская глина. В районе Ивановских порогов река прорезает известняки, дно здесь скалистое. На перекатах на дне обнажаются плотные моренные суглинки.

По типу руслового процесса Нева относится к немеандрирующим руслам с русловой многорукавностью. Ниже Литейного моста Нева разветвляется на ряд рукавов, мелких протоков и каналов, общая длина которых составляет 165 км, образуя обширную дельту. Площадь дельты Невы составляет 80 км², из которых 20 км² приходится на водную поверхность, остальное – на острова. В современных условиях формирование дельты продолжается, а естественные условия ее формирования в значительной степени нарушены хозяйственной деятельностью. Наиболее значимое влияние оказывает намыв территорий и дноуглубительные работы в рукавах дельты. Самый крупный в дельте рукав Большой Невы представляет собой продолжение основного русла Невы. Длина Большой Невы составляет 6,2 км, ширина достигает 400 м, а глубина – от 8,2 до 12,8 м.

Большая Нева впадает в Невскую губу между островами Васильевским и Канонерским.

Нева, входящая в систему водотоков и водоемов Балтийского бассейнового округа, вытекает из Ладожского озера и впадает в Невскую губу Финского залива Балтийского моря. С учетом бассейна Ладожского озера, но исключая водные объекты бассейна Онежского озера, водосборная площадь бассейна Невы составляет 281 тыс. км² при длине реки всего 74 км. Площадь собственного бассейна Невы 5,18 тыс. км², что составляет около 2% от общей площади бассейна.

Нева является частью Волго-Балтийского водного пути и Беломорско-Балтийского канала и судоходна на всем своем протяжении. Водосборная площадь Невы расположена на территории нескольких субъектов Северо-Западного федерального округа Российской Федерации (СЗФО): Санкт-Петербург, Ленинградская, Новгородская, Вологодская области, Республика Карелия; а также часть водосборной площади находится в Финляндии.

Рельеф. Современный рельеф бассейна сформировался во время Валдайского оледенения в период от 50 до 10 тыс. лет тому назад, что и определило разнообразие «последледникового» рельефа. На Балтийском кристаллическом щите преобладал вынос, а на Русской равнине – аккумуляция ледниковых наносов.

Низменные пространства занимают большую часть территории: Невская и Приладожская низменности, Вуоксинская и Свирская низины и др.

Среди обширных равнин выделяются участки холмистых образований и гряды, имеющие водно-ледниковое происхождение. Среди возвышенностей района можно выделить: обширное Ижорское плато (до 160 м), Вепсовскую и Лемболовскую возвышенности (от 200 до 300 м), Тихвинскую гряду (до 280 м), отдельные небольшие возвышенности вблизи Санкт-Петербурга: Дудерговские, Пулковские и Парголовские высоты (от 100 до 300 м) и др.

Балтийско-Ладожская область ограничена на юге глинтом – уступом, протянувшимся вдоль южного берега Финского залива и Ладожского озера от г. Нарвы до р. Волхов. Максимальные абсолютные высоты бровки глинта – на Ижорской возвышенности. Другая зона провинции аккумулятивного ледникового рельефа – Волховско-Ловатская область, представляет собой равнину, наклоненную от периферии к центру (к Ильменской низине и к Ладожскому озеру). Озерно-ледниковые равнины окаймляются поясом моренных равнин с отметками высот от 50 до 110 м. Они имеют выровненную поверхность, на которой иногда встречаются скопления валунно-галечного материала. К этой полосе приурочены обширные водораздельные болотные массивы.

Ландшафты. В физико-географическом строении территории на микрорегиональном таксономическом уровне выделено 34 ландшафта, относящихся к 14 видам.

В зональном делении исследуемой территории выделяются подзоны средней и южной тайги. В пределах ландшафтной области выделяются ландшафтные провинции и подпровинции, каждая из которых является соответственно частью природной зоны или подзоны. Большая часть бассейна р. Нева расположена в восточноевропейском секторе таежной зоны в пределах Северо-Западной таежной провинции. Более 90% территории области относится к южнотаежной подпровинции и лишь небольшая площадь на крайнем северо-востоке - к северотаежной.

Почвы. В условиях превышения количества осадков над испарением с поверхности суши, что характерно для Северо-Западного региона, на территории бассейна Невы главным образом образуются почвы подзолистого типа, бедные перегноем и отличающиеся высокой степенью кислотности. Другой характерной особенностью является значительная переувлажненность большинства почв региона. При этом, на суглинках, в низких местах с повышенным накоплением влаги, преобладают сильноподзолистые почвы с мощным верхним слоем, с увеличением высоты

- среднеподзолистые почвы, на супесях и песках – слабоподзолистые почвы. Там, где преобладает травяная растительность – на лесных вырубках, в редких смешанных или лиственных лесах – образуются дерново-подзолистые почвы. В целом, для бассейна Невы характерна значительная неоднородность почвенного покрова. Характер распространения по территории бассейна различных типов почв зависит от состава почвообразующих пород, характера растительного покрова, рельефа местности и режима увлажнения.

Растительность. Территория бассейна расположена в таежной зоне. Большая часть территории расположена в подзоне южной тайги, где в хвойных лесах есть незначительная примесь широколиственных пород. В их подлеске много растений из южных широколиственных лесов. Отмечается переход от хвойных лесов к смешанным к югу. Сильно истощены лесные ресурсы. Коренные сосновые и, особенно, еловые леса сохранились преимущественно на северо-западе и востоке района. В основном, на территории бассейнов рек коренные леса замещены малоценными и малопродуктивными производными мелколиственными лесами и мелколесьями, занятыми берёзами, осинами, ольхой серой и др. породами. Большинство территорий, прилегающих к Санкт-Петербургу, заняты под сельскохозяйственное производство.

Основные климатические характеристики. Водосборный бассейн Невы, принадлежащий Балтийской водной системе, расположен в умеренном климатическом поясе, атлантико-континентальной лесной области, западной подобласти. Под воздействием морских атлантических и континентальных воздушных масс умеренных широт, частых вторжений арктического воздуха и активной циклонической деятельности формируется климат, основными особенностями которого являются высокая влажность воздуха, умеренно теплое и влажное лето и довольно продолжительная умеренно холодная зима с частыми оттепелями. Циркуляция атмосферы в основном определяет формирование климата в холодный период, когда регион испытывает наибольшее влияние Атлантики. С атлантическими циклонами поступает

значительное количество тепла, за счет которого зима смягчается, а осень оказывается теплее весны. Весной и летом циклоническая деятельность существенно ослабевает, в связи с чем повышается климатообразующая роль радиационных факторов. Разнообразие синоптических процессов и частая смена воздушных масс являются причиной больших междусуточных колебаний метеорологических параметров.

Перепады температуры воздуха, обусловленные сменой воздушных масс, могут значительно превышать амплитуду суточных колебаний и нередко достигают $\pm 20^\circ$ и более.

Особенностью климатических условий на территории бассейна Невы является неоднородность погодных условий, обусловленная большой протяженностью с запада на восток, разнообразием ландшафтов и близостью крупных водоемов (Финский залив Балтийского моря, Ладожское и Онежское озера). В связи с такими особенностями циркуляции атмосферы зимой наиболее холодными являются восточные и северо-восточные районы бассейна, а самыми теплыми – юго-западные.

На территории бассейна наблюдаются практически все опасные метеорологические явления: сильные ветры, в т.ч. шквалы и смерчи, снегопады, метели, гололед, туман, сильные морозы, кратковременные интенсивные ливни и продолжительные дожди, грозы, град, лесные пожары, засуха и наводнения.

Зима продолжается в среднем 3,5 месяца (с начала декабря до середины марта). Для первой половины зимы, вследствие преобладания западного переноса воздушных масс, характерна пасмурная, ветреная, с частыми осадками и оттепелями погода. Во второй половине зимы зональная циркуляция чаще нарушается вторжениями арктического воздуха - холодного и сухого. Облачность заметно уменьшается, оттепели отмечаются реже. В зависимости от особенностей атмосферной циркуляции отдельные зимы могут быть как экстремально теплыми, так и экстремально холодными. Средняя многолетняя температура зимой понижается от -5°C в декабре до -

8,5°C в феврале. Изменчивость средних месячных температур от года к году может существенно превышать их средние многолетние значения. Так, например, январь 1987 года был на 10° ниже нормы, а февраль 1990 почти на столько же выше нормы. Абсолютный минимум температуры воздуха в Санкт-Петербурге составил 35.9°C (11 января 1883 г.). После 1970 года самые сильные морозы в Санкт-Петербурге наблюдались в 1978 и 1987 гг., когда температура воздуха понижалась до -35°C.

Весна продолжается в среднем с середины марта до начала июня. Характерной особенностью весеннего периода являются волны тепла и волны возвраты холода. Во второй половине апреля – в начале мае с выносом воздуха из южных широт на некоторое время может установиться летняя жара с температурой до 25°-30°C, а при вторжениях арктического воздуха, даже в конце мая – начале июня, наблюдаются заморозки и может образоваться кратковременный снежный покров. Относительная влажность и число дней с осадками в это время года – наименьшие, а количество ясных дней - наибольшее в году. Продолжительность осадков уменьшается от 130 часов в марте до 60 часов в мае. Усиления ветра наблюдаются значительно реже, чем зимой.

Лето – умеренно теплое и длится в среднем от начала июня до конца первой декады сентября. Средняя многолетняя температура летних месяцев составляет от 14 до 17°C. Самый теплый месяц - июль. За весь имеющийся период наблюдений наиболее теплым было лето 1972 г., когда средняя месячная температура была на 3-4°C выше средней многолетней в каждом месяце, а самым холодным - лето 1976 года, когда все летние месяцы были на 1-3°C холоднее обычных. Количество осадков в этот период является самым большим по сравнению с другими сезонами. Большинство опасных явлений (ливни, грозы, град, шквалы) связаны с конвективной облачностью, развивающейся как на атмосферных фронтах, так и внутри неустойчивых влажных воздушных масс. Значительные усиления ветра в основном

кратковременны и имеют шквалистый характер, а повторяемость штилей - наибольшая.

Для осени характерны длительные периоды ненастной и дождливой погоды. Продолжительность осадков увеличивается в 2-3 раза, а продолжительность солнечного сияния сокращается от 140 часов в сентябре и до 25 - в ноябре. В сентябре и октябре за счет интенсивных волн тепла часто бывает период солнечной и теплой погоды, называемый «бабьим летом». В годы, когда наблюдается это явление, осень бывает теплой и сравнительно сухой. Морозная погода и устойчивый снежный покров иногда устанавливаются в конце октября, особенно в годы с интенсивными и частыми вторжениями арктического воздуха. Средняя многолетняя температура воздуха понижается от $+11^{\circ}\text{C}$ в сентябре и до 0°C - в ноябре. Самой теплой за последние 30 лет была осень 1974 года, когда средняя месячная температура всех месяцев была на $2-3^{\circ}\text{C}$ выше нормы, а самой холодной - осень 1993 года, когда все месяцы оказались на $1-5^{\circ}\text{C}$ ниже нормы.

Температура воздуха. Самым холодным месяцем на большей части территории является январь, температура которого колеблется от -8°C в западной до -11°C в восточной части области, довольно близка к нему температура февраля. Самым жарким месяцем является июль, с температурой $16-17^{\circ}\text{C}$. Период с устойчивыми морозами продолжается в среднем 102 дня. Средними датами их наступления и прекращения являются 4 декабря и 15 марта. Характерной особенностью холодного периода являются оттепели. В начале и середине зимы они, как правило, имеют адвективное происхождение, в конце – радиационное. Для климата региона характерны резкие перепады температуры воздуха как внутри суток, так и в течение нескольких суток.

Влажность воздуха. Вследствие преобладания морских воздушных масс влажность воздуха на рассматриваемой территории велика в течение всего года. Число дней, когда влажность воздуха в течение суток выше 80%,

составляет в среднем за год 140-155, дни с влажностью 30% и менее довольно редки и составляют в сумме за год всего 4-12 дней.

Атмосферные осадки. Интенсивная циклоническая деятельность определяет режим осадков в течение года и даже летом, когда она ослабевает, осадки внутримассового характера составляют незначительную часть. В среднем по региону выпадает 600-700 мм в год. В годовом ходе минимум наблюдается в феврале-марте, иногда в июле. Вследствие развития циклонической деятельности наибольшее за год количество осадков выпадает в летний период – 66% (IV–X), в холодное время года (XI–III) - 34% от общего количества осадков. Изменчивость месячных сумм осадков из года в год, довольно велика, особенно в теплый период. Большая часть осадков выпадает в жидком виде (60-70%), на твердые осадки приходится 25-30%, остальная часть – смешанные осадки.

Облачность. Годовой ход для нижней и общей облачности схож для всей территории. Максимально небо закрыто облаками в холодное полугодие, летом значения общей облачности не превышают 6,5 баллов, а нижней 4,5 баллов.

Снежный покров. Снежный покров появляется первый раз в конце октября - начале ноября, устойчивый снежный покров образуется в последних числах ноября – первой декаде декабря. Окончательно снег сходит во второй половине апреля. Максимальное число дней со снегом приходится на северо-восточные, восточные районы области, а также Карельский перешеек.

Испарение с поверхности суши и водоемов. Годовой слой испарения составляет 380 мм в год для большей части территории, изменяясь от 10-30 мм в марте-апреле, сентябре-октябре до 90 мм в июне-августе. Максимум отмечается в июле в соответствии с теплообеспеченностью и максимумом температуры воздуха и радиационного баланса. Годовой ход характеризуется интенсивным возрастанием величин от весны к лету и таким же быстрым убыванием их от лета к осени. В зимние месяцы, когда радиационный баланс

отрицателен, и вследствие этого испаряемость близка к нулю, испарение практически отсутствует. Длина этого периода составляет в разные годы до 4 месяцев.

2.2 Невская губа

Невская губа самый мелководный и наиболее опресненный район восточной части Финского залива. Ее длина составляет 21 км, наибольшая ширина – 15 км, площадь водного зеркала – 329 км², преобладающие глубины 3-5 м, максимальная глубина – 12 м отмечается в Морском канале.

Водная масса губы характеризуется высокой динамичностью, обусловленной, в первую очередь влиянием стока Невы и воздействием активного ветрового перемешивания. Основное течение формируется стоком р. Невы и направлено с востока на запад. На него накладываются ветровые и прочие виды течений. Скорость ветровых течений составляет от 1 м/сек при слабых до 7 м/сек при сильных ветрах.

2.2.1. Климатические характеристики

Восточная часть Финского залива расположена в умеренной климатической зоне, для которой характерны небольшие суточные и годовые колебания температуры воздуха, высокая влажность, значительная облачность и частые осадки.

В течение всего года над акваторией восточной части Финского залива происходит смена воздушных масс морского, континентального и арктического происхождения. Изменения метеорологического режима обусловлено чередованием типов циркуляции воздушных масс.

Зима (XI-II) в этом районе довольно мягкая, с преобладанием пасмурной погоды и частыми осадками. Сильные морозы бывают редко и обычно не продолжительны. Ветры нередко достигают силы шторма. В течение зимы наблюдаются оттепели.

Весна (III-V) прохладная с небольшим количеством осадков и слабой штормовой деятельностью. Характеризуется частыми возвратами холодов, возможно установление кратковременного снежного покрова.

Лето (VI-VIII) обычно прохладное. Жаркая погода бывает редко и продолжается недолго.

Осень (IX-XI) теплая, сырая, ветряная, с частыми продолжительными осадками, туманами и штормами. Понижение температур воздуха осенью происходит медленно.

Среднегодовая температура составляет плюс 4,4°C, абсолютный максимум – плюс 34°C, абсолютный минимум – минус 36°C.

Средняя максимальная температура самого теплого месяца года – плюс 22°C, средняя минимальная температура самого холодного месяца года – минус 6,9 С.

Переход температуры воздуха через 0°C обеспеченностью 50 % приходится на 1 апреля и 16 ноября. Средняя дата появления снега - 4 ноября.

Ветер. Скорость ветра, вероятность превышения которого составляет 5 % - 5 м/с.

Среднее число дней с туманами в холодное время года (ноябрь-март) равно 39, а в теплое (апрель-октябрь) - 23.

В среднем ежемесячно наблюдается не менее одного-двух дней со штормовым ветром. Наибольшими скоростями (до 26 м/с) отличаются штормовые ветры западных направлений.

Господствующие ветры: зимой - южное, юго-западное направление; летом - западное, северо-восточное; в течение года – западное.

Средняя скорость ветра в летний период составляет 3,0 м/с, в зимний период 2,8 м/с.

Осадки. Годовое количество осадков в среднем равно 673 мм. Количество дней с осадками в среднем составляет 191 дней в году. Количество дней с грозой - 17.

Количество дней с осадками в среднем составляет 191 дней, причем зимой осадков больше, но их интенсивность невелика (в среднем составляет 0,2 – 0,4 мм/ч); летом осадков меньше, но интенсивность их больше (0,2 – 0,4 мм/ч, за счет ливневых осадков).

Стабильный снежный покров устанавливается в период с 6 по 14 декабря и его высота растет до конца февраля, начала марта. Максимальная высота снежного покрова меняется в течение зимы от 55 до 57 см на участках, открытых ветру, и от 61 до 63 см на защищенных от ветра участках. Среднее число дней со снежным покровом - 82. Снежный покров сходит с 12 по 18 апреля.

Влажность. Абсолютная влажность увеличивается от зимы к лету и от берегов в глубь водоемов. Весной и осенью ход абсолютной влажности схож с ходом температуры. Однако общее влагосодержание нижних слоев воздуха весной меньше, чем осенью. При прохождении циклона абсолютная влажность резко повышается, а при устойчивом антициклоне понижается.

Относительная влажность воздуха отличается крайней неустойчивостью. Она меняется в зависимости от температуры, осадков и др. В годовом ходе относительной влажности наименьшие величины наблюдаются в мае, наибольшие с ноября по январь. Относительная влажность имеет годовой ход в общем обратный температуре.

Суточный ход относительной влажности зимой почти отсутствует. При прохождении циклонов суточная амплитуда относительной влажности в теплое время года уменьшается порой до нуля. При антициклонической погоде суточный ход выражен четко, с максимумом в часы перед восходом солнца.

2.2.2 Уровень воды

Изменения отметок уровня воды на акватории Невской губы и Финского залива происходят под воздействием сгонно-нагонных явлений, стоячих сейшевых волн и при вторжении «длинной» волны с Балтики. Последний фактор определяет наибольшие повышения уровня воды (наводнения).

Изменение водности р. Невы практически не влияет на отметки уровней воды Невской губы. Самые значимые понижения уровня воды наблюдаются при сгонах, вызываемых сильными и продолжительными ветрами восточных румбов.

Величина сгонно-нагонных колебаний уровня достигает 100-120 см. Величина сейшевых колебаний составляет 20-30 см.

Наводнения происходят не только в навигационный период, но и при наличии льда. Зимние наводнения сопровождаются взломом ледяного покрова.

По данным г. п. Кронштадт средний уровень Балтийского моря ($P = 50\%$) составляет 0,0 м БС. Минимальный годовой уровень (1 раз в 25 лет) составляет минус 1,56 м БС. Максимальный наблюдаемый уровень был равен 367 см БС (ноябрь 1824 г.), а минимальный – минус 172 см БС (сентябрь 1883 г.).

2.2.3 Волнение и течения

Волнение. Мелководье, наличие многочисленных препятствий в Северных и Южных воротах, а главное частая смена силы и направления ветра – все это создает неупорядоченную систему волн в Невской губе. Как правило, в одно и то же время наблюдаются волны различной высоты и длины.

Ветровое волнение в губе довольно быстро нарастает по мере усиления ветра и почти столь же быстро затухает с его ослаблением. При

неизменном направлении ветра ход высоты волны всего на 1-2 ч отстает по фазе от хода скорости ветра.

Невская губа – беспокойный водоем. Так, в период, свободный ото льда, около 90 % времени наблюдается ветровое волнение и лишь 10 % времени – штиль.

Продолжительность периода с очень сильным волнением невелика и редко превышает 8-12 ч, но иногда достигает 3-4 суток подряд. Существенно, что ветровое волнение из Финского залива почти не проникает в Невскую губу. Этому препятствует Дамба КЗС, Ломоносовская отмель, о. Котлин, а также форты, ряжи, банки и другие препятствия в Северных и Южных воротах. Волнение развивается главным образом в самой губе. Параметры ветровых волн зависят от скорости и продолжительности действия ветра, длины разгона волн, а также от рельефа дна, т.е. от глубин на пути разгона волн и от глубин на подходах к проектируемым сооружениям.

Течения. Система течений на акватории Невской губы неустойчива.

Водные массы очень подвижны, вследствие ряда причин: воздействие ветра, мелководье, подъемы и спады уровней воды в результате сгонно-нагонных явлений, а также вторжения и отката «длинной» волны.

Течения здесь принято классифицировать по их происхождению, а именно:

- а) стоковые (создаются стоком р. Невы);
- б) стоково-градиентные (вызываются в основном колебаниями уровня воды);
- с) стоково-ветровые (образуются, главным образом, за счет ветра);
- д) суммарные (обусловлены совместным действием нескольких факторов).

Зимой, при наличии припая до о. Котлина, влияние ветра на формирование течений прекращается.

Ветер способен значительно менять скоростную структуру водных масс на отмелях, отклоняя поток от основного направления стокового течения, ориентированного на запад.

Суммарные течения, осредненные по глубине, на акватории проектирования могут иметь циркуляционный характер.

При ветрах северо-восточного, восточного и северного румбов суммарные течения на всей акватории проектирования направлены в основном на запад.

При ветрах северо-западных, западных и юго-западных румбов преобладают юго-восточные течения, а в центральной части акватории проектирования образуются циркуляционные течения, направленные против часовой стрелки.

Средние скорости течения на акватории проектирования при всех направлениях ветра в основном не превышают 0,1 м/с и только в районе Морского канала и в отверстиях Дамбы в несколько раз больше. Непосредственно у берега течение слабое.

Максимальная скорость стоковых течений как в поверхностном, так и в придонном слое может достигать 0,3-0,5 м/с и наблюдается при южном, западном и северо-западном ветрах.

Максимальные измеренные скорости течений воды, направленные в губу (на восток) колебались от 0,16 до 0,3 м/с в поверхностном слое и от 0,14 до 0,25 м/с у дна. В данном районе при сильных восточных ветрах скорость течения может достигать 0,8 м/с.

При всех рассмотренных ветровых случаях течения в водопропускных отверстиях Дамбы КЗС и в проране Морского канала направлены из Невской губы в Финский залив. Исключение составляет лишь водопропускное отверстие Дамбы В1, расположенное вблизи берега, в котором при ветрах западных румбов прослеживается тенденция к смене направления течения.

При западном ветре скоростью 4-5 м/с поверхностные струи водного потока в водопропускном отверстии направлены из Финского залива в Невскую губу (с запада на восток), а при скоростях ветра, больших 5 м/с, вся водная масса движется в восточном направлении.

2.2.4 Температура воды и ледовый режим

Температура воды. Температура воды в Невской губе хорошо согласуется с ходом температуры воздуха. Средняя многолетняя температура воды на поверхности, в районе производства работ, 7,4°C. Средняя многолетняя температура воды на поверхности в период с мая по ноябрь изменяется от 11,3°C до 2,2°C, достигая в июле максимума 20,2°C, прогреваясь равномерно от поверхности до дна.

Ледовый режим. Из-за незначительной скорости течения воды ледообразование в Невской губе происходит в основном на водной поверхности. Первые ледяные образования в виде сала и шуги появляются спустя 1-2 дня после устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C, в среднем во второй декаде ноября. В дальнейшем они распространяются вдоль южного берега губы с востока на запад. При маловетреной морозной погоде сало и шуга быстро превращаются в припай, который затем скачкообразно продвигается к центру губы. В ветреную, слабоморозную погоду неокрепшие забереги часто взламываются.

Устойчивое образование льда обычно наблюдается через 10-15 дней после начала ледовых явлений. Полное замерзание акватории происходит в десятых числах декабря. В годы с ранними холодными зимами появление льда в Невской губе случалось уже во второй декаде октября, а полное схватывание припая происходило в начале ноября.

Нередко в начале зимы при толщине ледяного покрова до 15-20 см, отмечаются подвижки и торошение. Происходит это преимущественно при ветрах западных румбов, которые сопровождаются подъемом уровня воды.

С повышением уровня ледяной покров отрывается от берегов, в нем возникают сквозные трещины.

В малоснежную зиму, при сильных ветрах, ледяной покров губы оголяется. Из-за колебаний температуры воздуха в нем появляются многочисленные неглубокие трещины, а на стыке льда, примерзшего к грунту, и льда, находящегося на плаву – сквозные щели.

Образование сквозных береговых щелей может произойти и вследствие нагонов воды. Сквозные щели располагаются также между вдающимися в губу мысами и сооружениями. Щели сужаются под действием нажимных ветров и расширяются до размеров больших разводий при отжимных ветрах.

В прибрежной зоне шириной 1-3 км самая большая толщина ледяного покрова наблюдается в конце зимы (февраль-март): обычно 50-60 см. Наибольшая зафиксированная толщина льда к концу зимы 90-100 см (зимы 1939-40, 1941-42 и 2002-03 гг.), а ко дню вскрытия губы — 65-70 см.

Максимальная толщина ледяного покрова 1% обеспеченности в Невской губе у г. Кронштадт равна 100 см.

Верхний слой ледяного покрова Невской губы представлен снежным зернистым льдом, а нижний приходится на кристаллический лёд. Лёд покрыт слоем снега высотой в среднем 10 см.

Существующая в настоящее время Дамба КЗС оказывает влияние на толщину припая только в зоне контакта с ледяным полем и в водопропускных отверстиях. В зоне контакта ледяного покрова со стенками водопропускных сооружений и откосами дамб происходит увеличение толщины примерзшего льда в 2-3 раза по сравнению с ровными участками припая, на расстоянии от места контакта до 30 м.

Вследствие притока солоноватых морских вод и смешению их с пресной невской водой в период зимних наводнений на западном участке Морского канала происходит образование шуги.

В очень теплые зимы случаются значительные нагонные подъемы воды. Максимальная толщина ледяного покрова в Невской губе при зимних наводнениях достигала: в декабре 20-30 см, в январе 30-40 см, в феврале и марте 40-55 см. Средняя толщина припая в южной части Невской губы при зимних наводнениях составляла 20-30 см. Часто при наводнениях лёд на акватории дрейфует. Взлом припая (частичный или полный) происходит при уровнях выше 0,50 м БС.

В последние десятилетия на Финском заливе осуществляется круглогодичная навигация, ледяной покров в Морском канале взламывается ледоколами. При этом под кромку ледяного покрова винтами судов загоняется раздробленный лед, формируя вдоль трассы канала скопления ледяного материала значительной толщины.

Весной разрушение ледяного покрова в Невской губе начинается с образования разводий вдоль берегов.

Под действием солнечной радиации и талой воды ледяной покров теряет прочность, его толщина уменьшается. Затем возникают проталины и промоины, в первую очередь в местах, где лед загрязнен, и в местах сброса теплых бытовых и производственных сточных вод.

Фронт вскрытия в губе скачкообразно распространяется с востока на запад и от центра к берегам. Первые взломы припая наблюдаются обычно в первой декаде апреля, хотя возможно и более позднее начало разрушения ледяного покрова, вплоть до первой декады мая.

Следует отметить, что сроки замерзания и взлома припая на акватории Невской губы за последние десятилетия заметно изменились. Это связано с возрастанием интенсивности судоходства в этом районе. К тому же, перекрытие судопропускного отверстия в Северных воротах привело к увеличению скоростей течения южнее о. Котлина и, соответственно, – к более поздним срокам замерзания.

По визуальным наблюдениям весной сразу после взлома припая около половины всех льдин имеют линейные размеры менее 500 м.

Площадь некоторых льдин может достигать 2 км² (2 х 1 км), а скорость их дрейфа при сильном ветре до 0,30 м/с.

Сохраняющийся припай в Северных и Южных воротах препятствует выносу плавучего льда из губы в залив. Льдины тают на месте.

Плавучий лед в губе держится от 5-8 до 15-20 суток. Окончательное очищение ото льда обычно происходит в конце апреля – начале мая. После исчезновения собственного льда в губу приносится некоторое количество ладожского льда, который быстро тает, не достигая о. Котлина.

3 СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УРОВНЕЙ ВОДЫ НЕВЫ И НЕВСКОЙ ГУБЫ

В качестве исходных данных для проведения спектрального анализа использовались ежедневные (9 и 21 ч.) наблюдения за уровнем воды Невы и Невской губы с сайта ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» http://www.meteo.nw.ru/weather/lo_levelsd.php за период с октября 2015 г. по ноябрь 2017 г. (рис. 3.1).

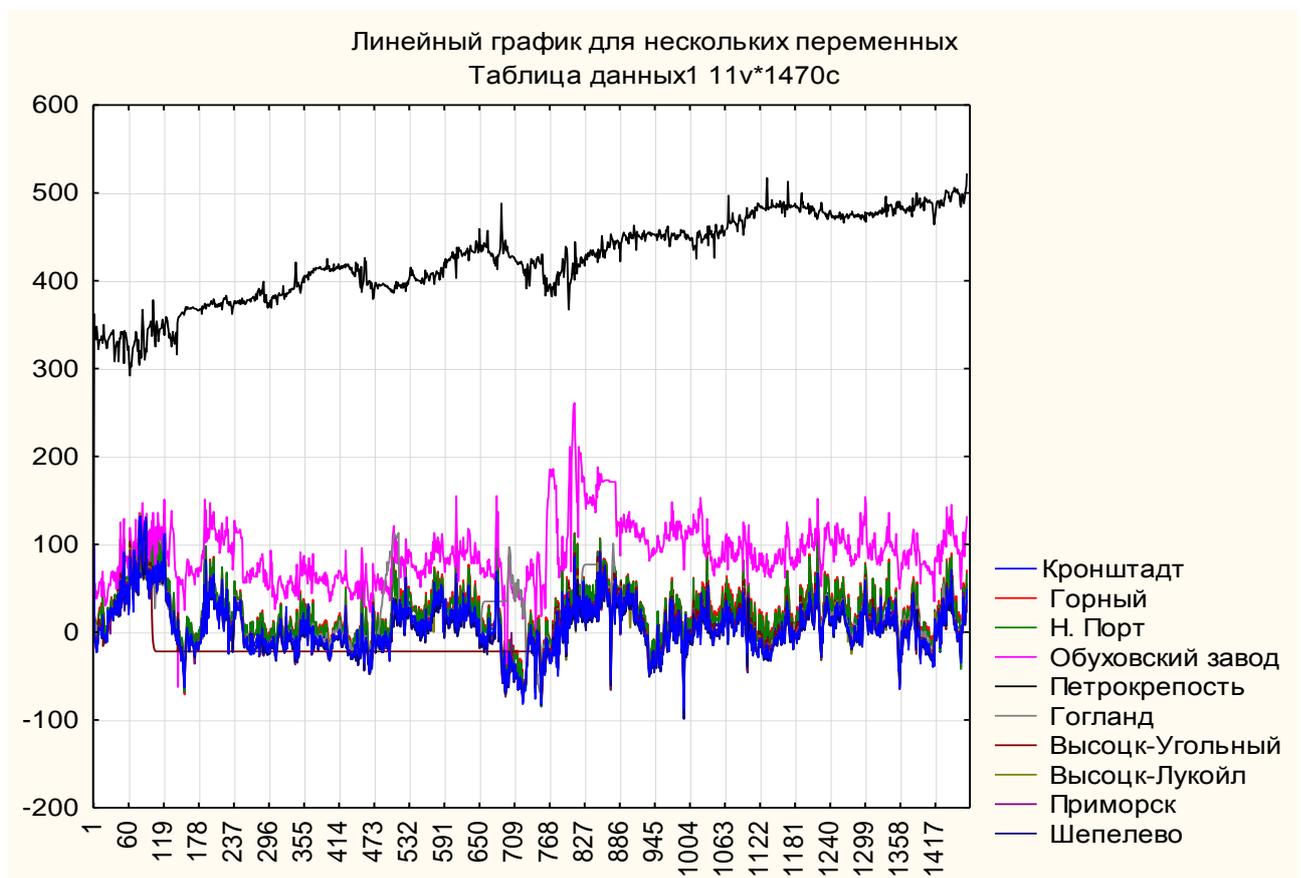


Рисунок 3.1 – График изменения уровня воды по исследуемым постам за период с октября 2015 г. по ноябрь 2017 г.

Перед проведением спектрального анализа в программе Excel рассчитаны статистические характеристики рядов исходных данных, представленные в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Описательная статистика исходных рядов наблюдений за уровнем воды.

Характеристика	Кронштадт	Горный	Н. Порт	Обуховский завод	Петро-крепость	Гогланд	Выборг	Высоцк-Угольный	Высоцк-Лукойл	Приморск	Шепелево
Среднее	13	24	22	89	424	18	-2	6	5	3	7
Стандартная ошибка	0,76	0,78	0,78	0,90	1,35	1,08	0,71	0,74	0,74	0,73	0,76
Медиана	10	23	19	87	427	12	-17	4	4	1	4
Мода	3	28	10	87	483	35	-22	-9	-8	6	-5
Стандартное отклонение	29	30	30	35	52	41	27	28	28	28	29
Дисперсия выборки	838	886	897	1198	2684	1701	735	807	794	773	840
Эксцесс	0,70	0,75	0,85	2,25	33,78	17,74	1,27	1,35	1,34	1,38	1,61
Асимметрия	0,23	0,20	0,23	0,77	-2,58	3,20	1,13	0,44	0,45	0,46	0,52
Размах	215	213	219	323,5	877,5	433	198	233	230	227	219
Минимум	-93	-79	-85	-62,5	-355,5	-78	-95	-98	-98	-99	-88
Максимум	122	134	134	261	522	355	103	135	132	128	131
Количество наблюдений	1469	1469	1469	1468	1468	1468	1469	1469	1462	1466	1469

Дополнительно в программе Excel рассчитаны коэффициенты корреляции, результаты расчетов приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Коэффициенты корреляции для исследуемых рядов уровней воды

	Кронштадт	Горный	Н. Порт	Обуховский завод	Петро-крепость	Гогланд	Выборг	Высоцк-Угольный	Высоцк-Лукойл	Приморск
Кронштадт	1									
Горный	0,98	1								
Н. Порт	0,99	0,99	1							
Обуховский завод	0,65	0,65	0,65	1						
Петро-крепость	-0,17	-0,09	-0,12	0,17	1					
Гогланд	0,29	0,28	0,28	0,19	-0,11	1				
Выборг	0,65	0,65	0,64	0,54	0,11	0,31	1			
Высоцк-Угольный	0,97	0,94	0,94	0,59	-0,21	0,30	0,66	1		
Высоцк-Лукойл	0,96	0,93	0,94	0,59	-0,19	0,30	0,67	0,98	1	
Приморск	0,97	0,94	0,94	0,59	-0,22	0,30	0,66	0,99	0,98	1
Шепелево	0,97	0,94	0,94	0,59	-0,21	0,30	0,65	0,97	0,97	0,98

В таблице 1.2 выделены значимые коэффициенты корреляции. Из таблицы видно, что значимой линейной зависимости нет между постами Обуховский завод, Петрокрепость, Гогланд и Выборг. Графики зависимостей между постами, подтверждающие таблицу 1.2, представлены в Приложении А.

Спектральный анализ проводился с помощью пакета Statistica 10.

Например, для поста Кронштадт получены следующие графики (рис. 3.2 и 3.3).

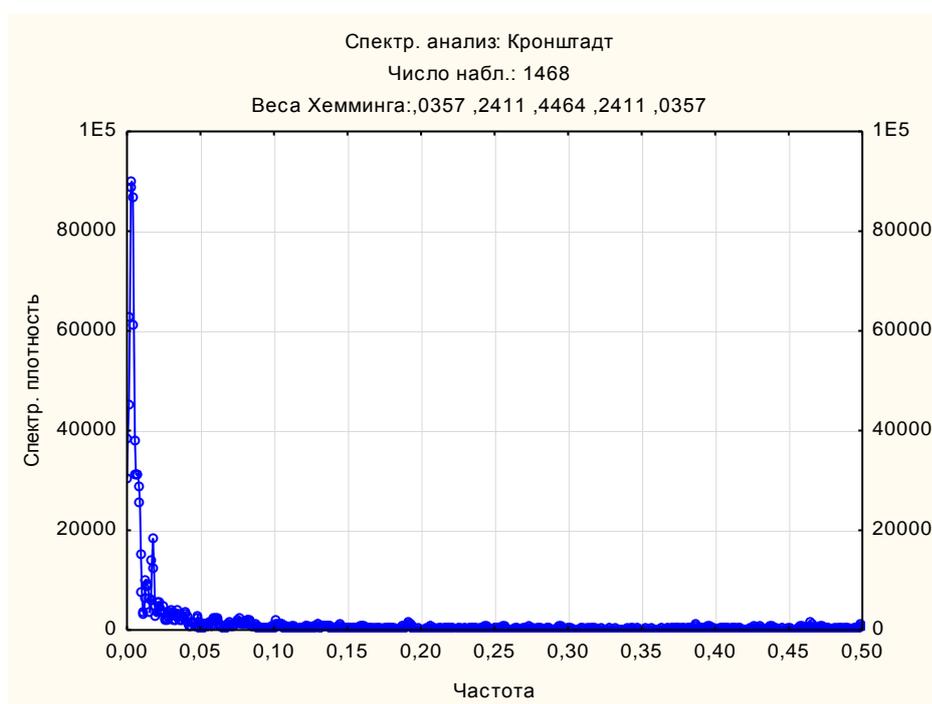


Рисунок 3.2 – График спектральной плотности в зависимости от частоты для поста Кронштадт

Частота – это число циклов в единицу времени (где каждое наблюдение составляет одну единицу времени). Таким образом, частота 0,0027 соответствует значению 370 периода (число единиц времени, требующихся на полный цикл). Поскольку данные об уровне представляют собой полусуточные наблюдения, можно заключить, что существует ярко выраженный 185-суточный (полугодовой) цикл в изменении уровней воды.

Обычно для вычисления оценок спектральной плотности периодограмму сглаживают, чтобы убрать случайные колебания. Тип

взвешенного скользящего среднего и ширину окна можно выбрать. В данной работе использовалось выбранное по умолчанию окно (Хемминга ширины 5).

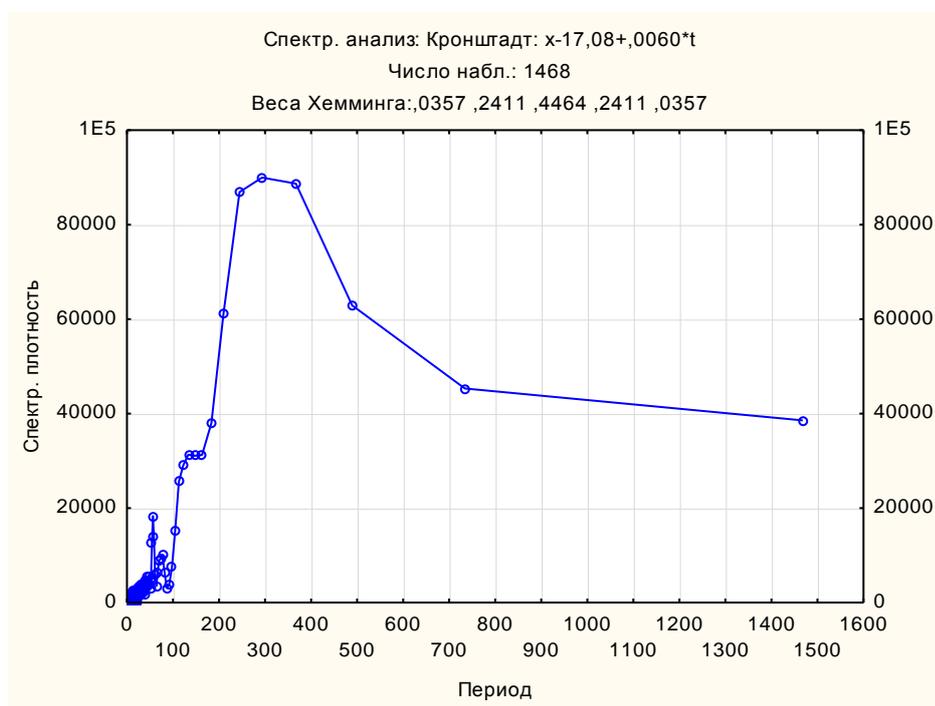


Рисунок 3.3 – График спектральной плотности в зависимости от периода для поста Кронштадт

На рис. 3.3 снова видно, что существует ярко выраженный полугодовой цикл в изменении уровня воды; более того, есть признаки существования более коротких примерно месячного и 2,5-месячного циклов.

Графики спектральной плотности по остальным постам представлены в Приложении Б. Основные результаты обобщены в таблице 3.3.

В таблице 3.3 видно, что для рядов по постам Обуховский завод, Петрокрепость, Гогланд и Выборг выделяется годовой цикл изменения уровней воды. Для постов Кронштадт, Невская Порт и Выборг видно полугодовой цикл. И для всех постов наблюдается месячный цикл изменения уровней.

Таблица 3.3 – Основные результаты спектрального анализа

Частота, соответствующая максимуму спектр. плотности	Период, полусут.	Период, сут.	Период, год	Период, мес.	Период, соответствующий максимуму спектр. плотности	Период, сут.	Период, год	Период, мес.
Кронштадт								
0,0027	370	185	0,51	6,09	56,46	28	0,08	0,93
0,0041	244	122	0,33	4,01	146,8	73	0,20	2,41
0,0177	56	28	0,08	0,93	293,6	147	0,40	4,83
Горный								
0,0041	244	122	0,33	4,01	56,46	28	0,08	0,93
0,0177	56	28	0,08	0,93	244,7	122	0,34	4,02
Невская Порт								
0,0027	370	185	0,51	6,09	56,46	28	0,08	0,93
0,0177	56	28	0,08	0,93	133,4	67	0,18	2,19
					293,6	147	0,40	4,83
Обуховский завод								
0,0014	714	357	0,98	11,74	48,9	24	0,07	0,80
0,0204	49	25	0,07	0,81	734	367	1,01	12,07
Петрокрепость								
0,0041	244	122	0,33	4,01	244,7	122	0,34	4,02
0,0116	86	43	0,12	1,42	734	367	1,01	12,07
Гогланд								
0,0014	714	357	0,98	11,74	73,4	37	0,10	1,21
0,0109	92	46	0,13	1,51	122,3	61	0,17	2,01
0,169	6	3	0,01	0,10	163,1	82	0,22	2,68
					734	367	1,01	12,07
Выборг								
0,0007	1429	714	1,96	23,48	58,7	29	0,08	0,96
0,017	59	29	0,08	0,97	113	57	0,15	1,86
					367	184	0,50	6,03
					734	367	1,01	12,07
Высоцк-Угольный								
0,0034	294	147	0,40	4,83	56,46	28	0,08	0,93
0,0177	56	28	0,08	0,93	293,6	147	0,40	4,83
Высоцк-Лукойл								
0,0034	294	147	0,40	4,83	56,46	28	0,08	0,93
0,0177	56	28	0,08	0,93	244,7	122	0,34	4,02
Приморск								
0,0027	370	185	0,51	6,09	56,46	28	0,08	0,93
0,0177	56	28	0,08	0,93	293,6	147	0,40	4,83
Шепелево								
0,0027	370	185	0,51	6,09	56,46	28	0,08	0,93
0,0177	56	28	0,08	0,93	293,6	147	0,40	4,83

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спектральный анализ объединяет два важных теоретических подхода: статистический анализ временных рядов и методы анализа Фурье.

В спектральном анализе исследуются периодические модели данных. Цель анализа – разложить комплексные временные ряды с циклическими компонентами на несколько основных синусоидальных функций с определенной длиной волн. В результате успешного анализа можно обнаружить всего несколько повторяющихся циклов различной длины в интересующих временных рядах, которые, на первый взгляд, выглядят как случайный шум.

Спектр способствует пониманию физических причин, лежащих в основе изменений во времени гидрометеорологических величин, указывая периоды доминирующих колебаний и тех, чей вклад в энергию процесса незначителен. Физический анализ, основываясь на подобной информации, позволяет вникнуть в причину превалирования одних периодов над другими, предсказать устойчивость и неустойчивость соответствующих волн и, в конечном счете, объяснить их природу.

Следует отметить, что при образовании исходной статистической совокупности для гидрологических полей приходится учитывать, что гидрологические поля принципиально не допускают массового повторения при одинаковых внешних условиях. Поэтому, строго говоря, гидрологические поля могут быть названы случайными в смысле теории случайных процессов лишь условно.

Целью выпускной квалификационной работы является исследование колебаний уровней воды Невы и Невской губы с помощью спектрального анализа.

При этом были получены следующие основные результаты:

1. В работе показано, что на практике измерение гидрологических случайных процессов производится не непрерывно, а лишь для дискретных

значений аргумента. В этом случае имеется система сечений для данных конкретных значений аргумента, с которой можно оперировать.

2. Получены статистические оценки для уровней воды Невы и Невской губы. Оценки получены при предположении, что наблюдения являются независимыми и произведенными в одинаковых условиях, т.е. во время измерений комплекс всех учитываемых воздействий, исходных условий и связей остается неизменным.

3. Найдены периодические составляющие временных рядов.

На основании проведенного спектрального анализа можно сделать предположение, что в области низких частот случайный процесс изменения полусуточных значений уровня воды можно описать с помощью стохастической динамической модели, имеющей подобный спектр, и использовать эту модель в прогностических целях.

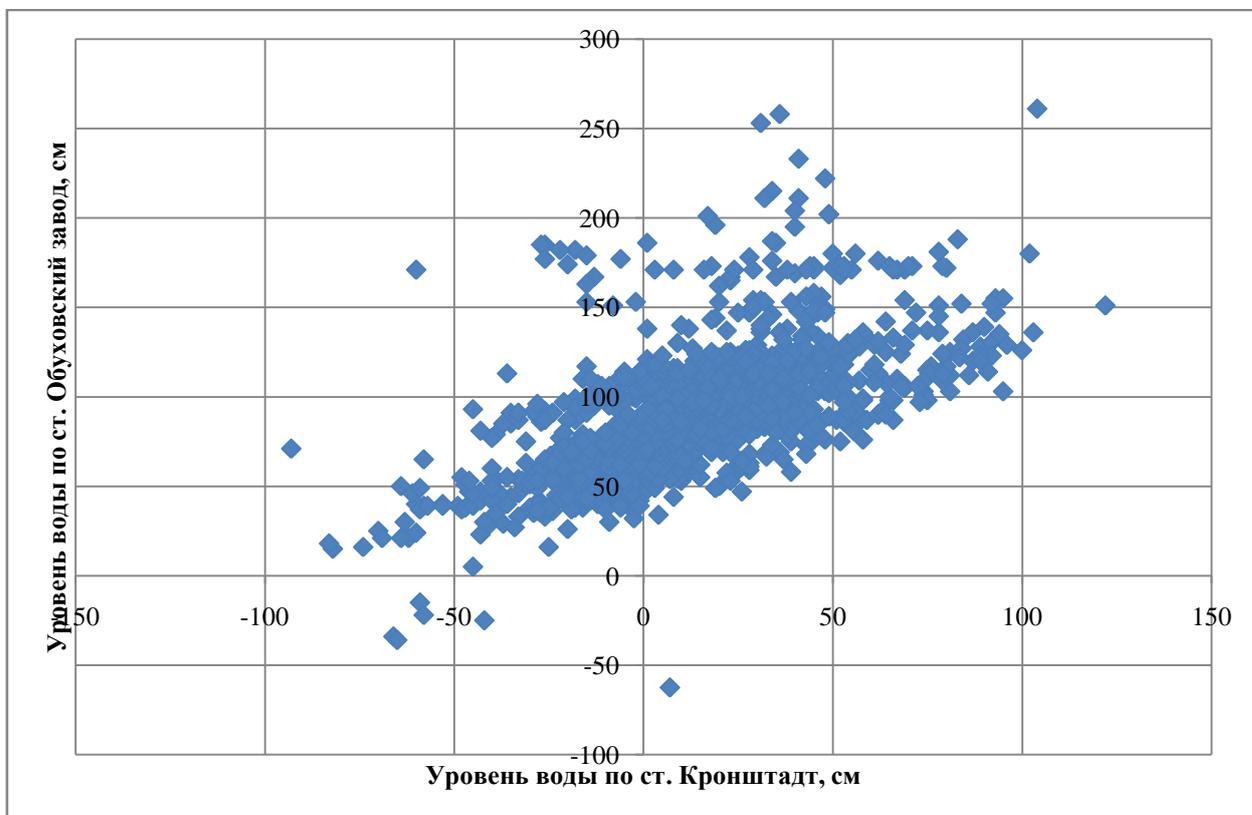
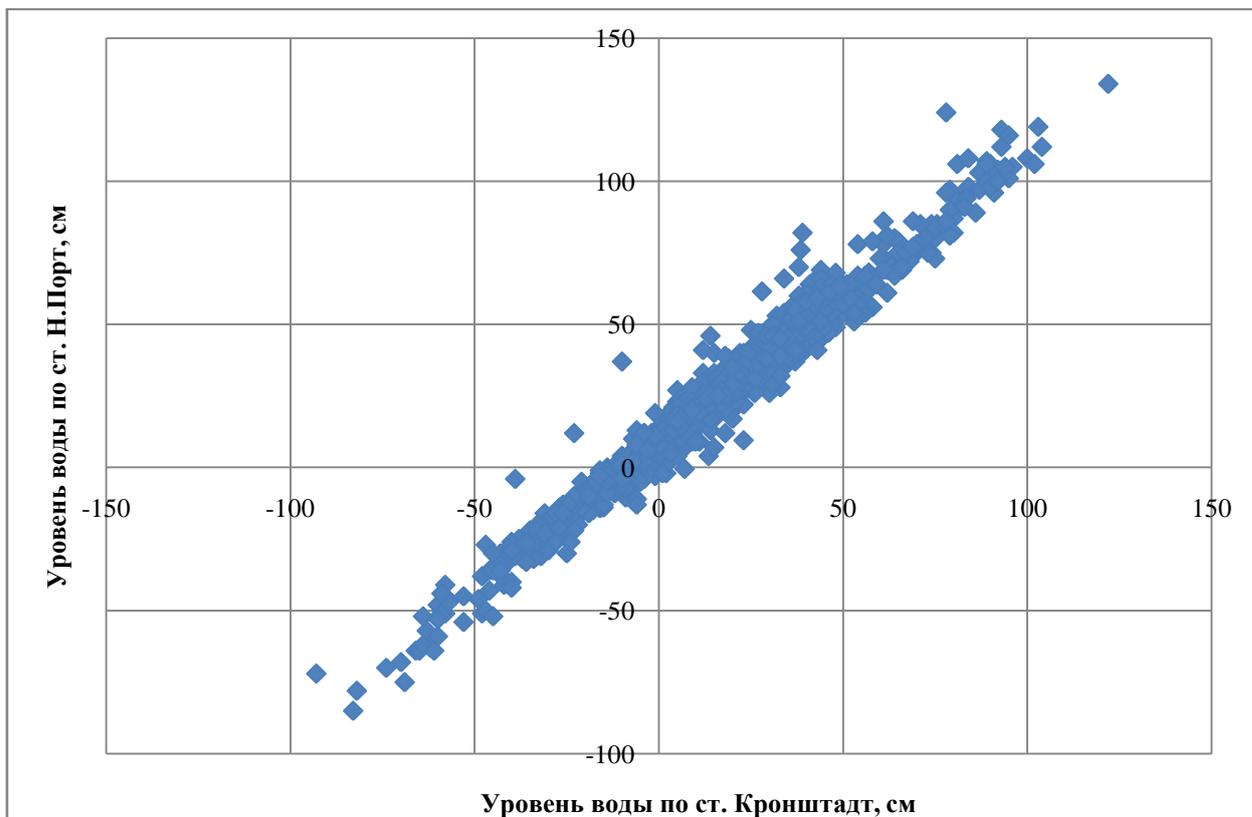
Таким образом, цель выпускной квалификационной работы достигнута полностью, выполнены поставленные задачи, учтены математические требования к проведению спектрального анализа временных рядов.

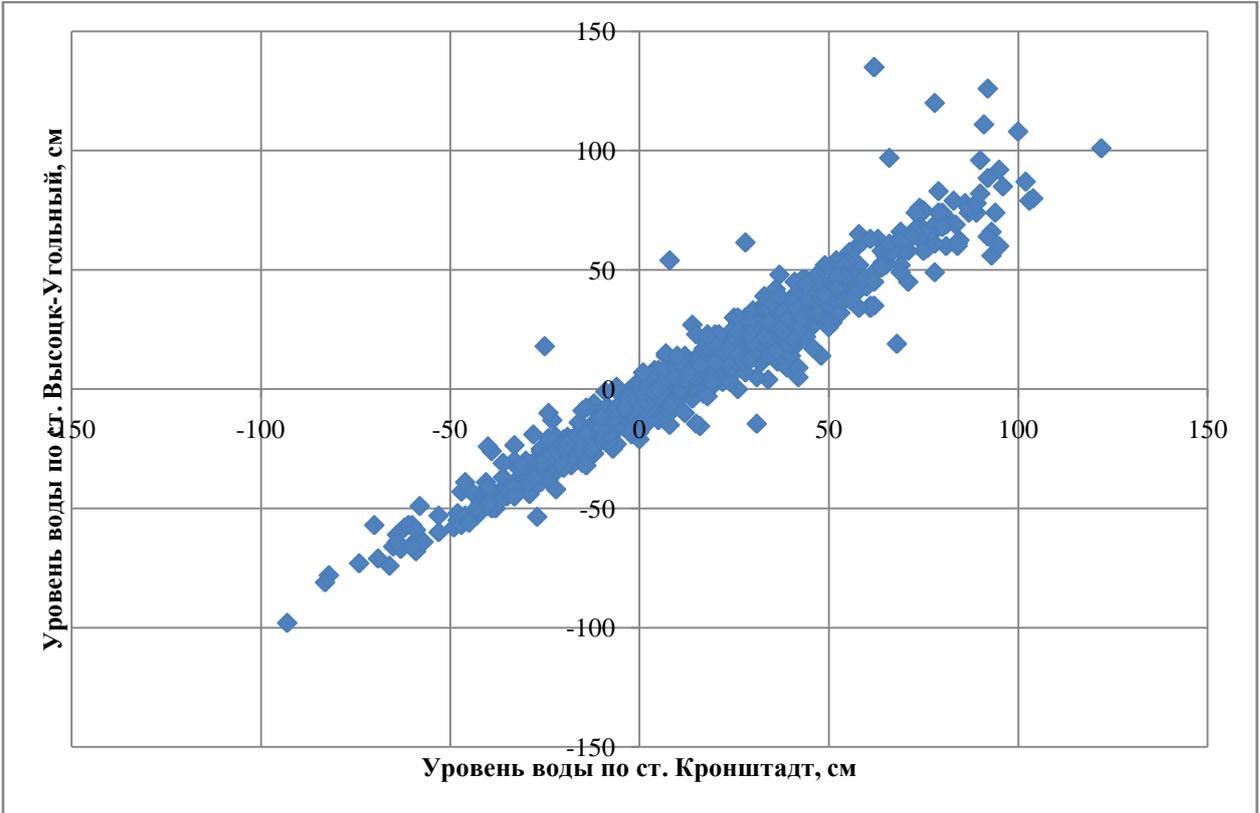
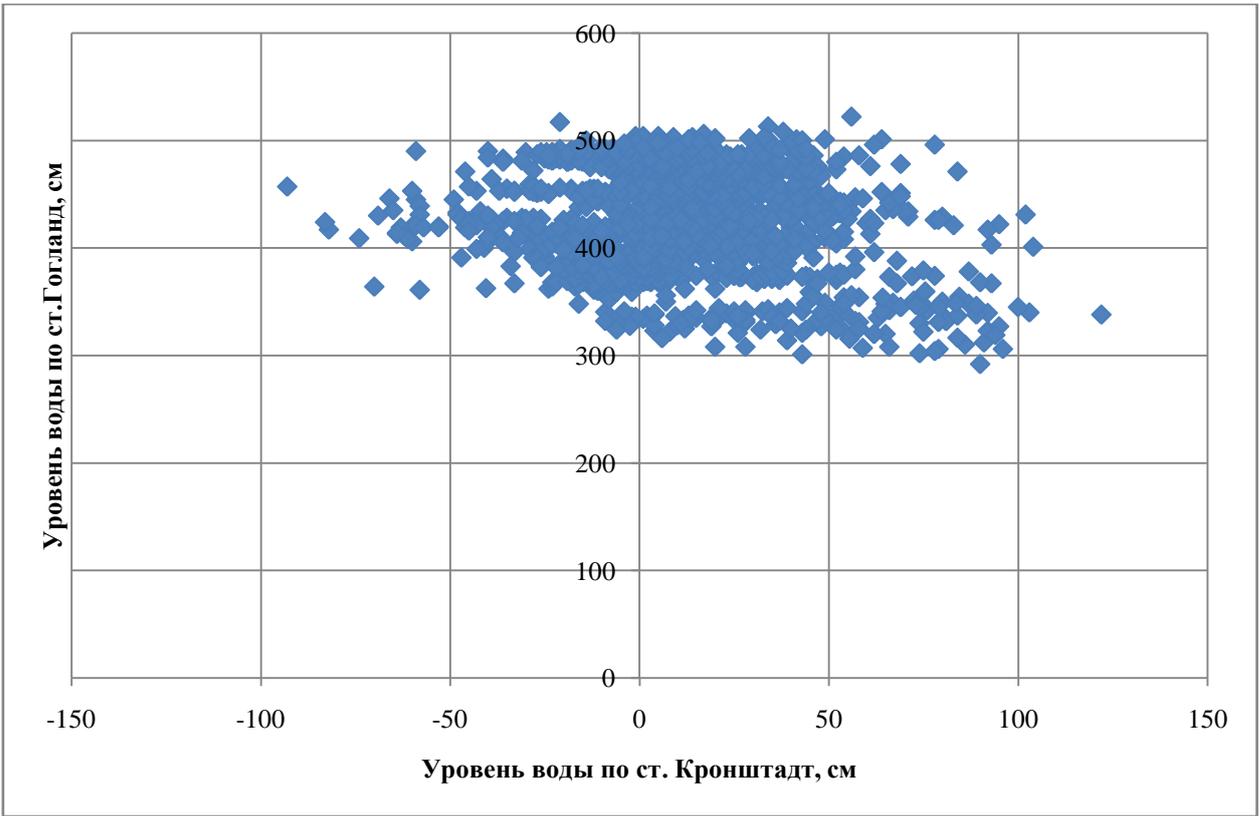
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

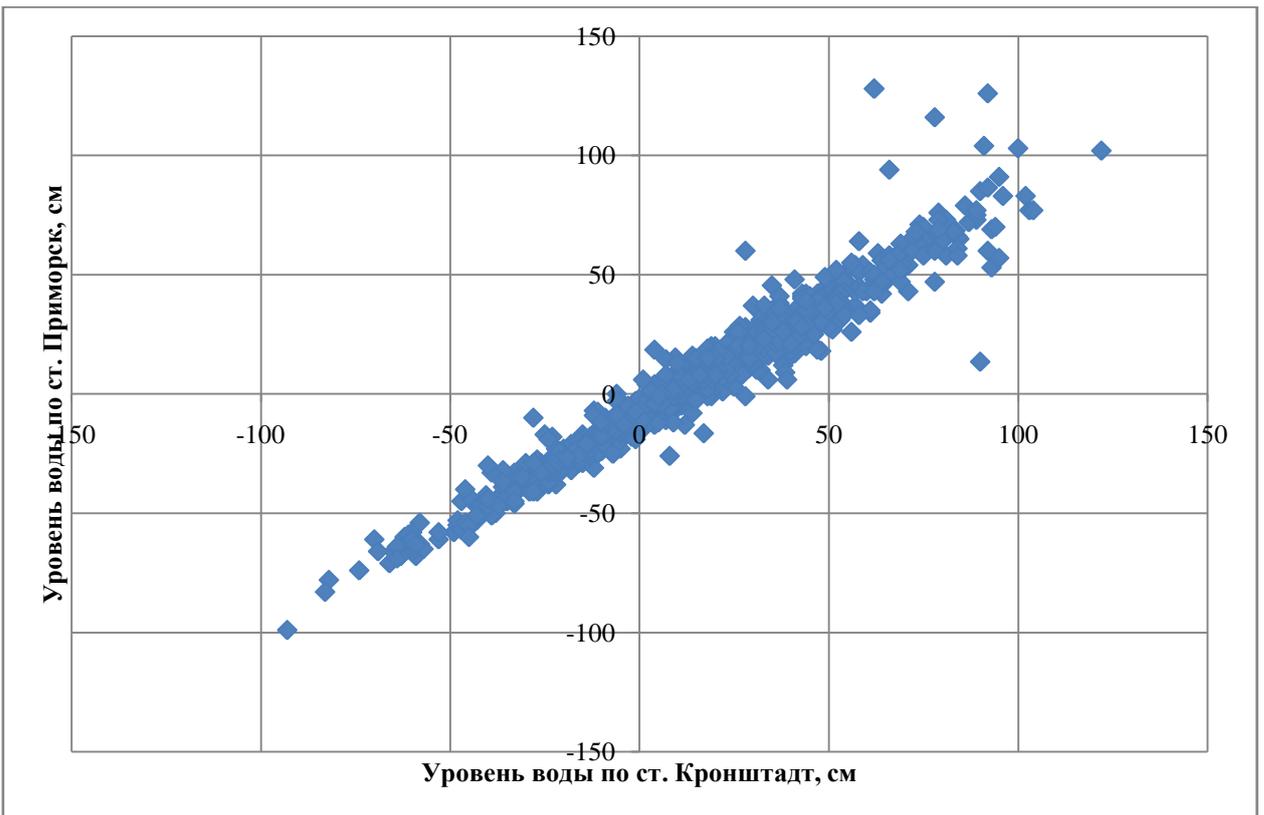
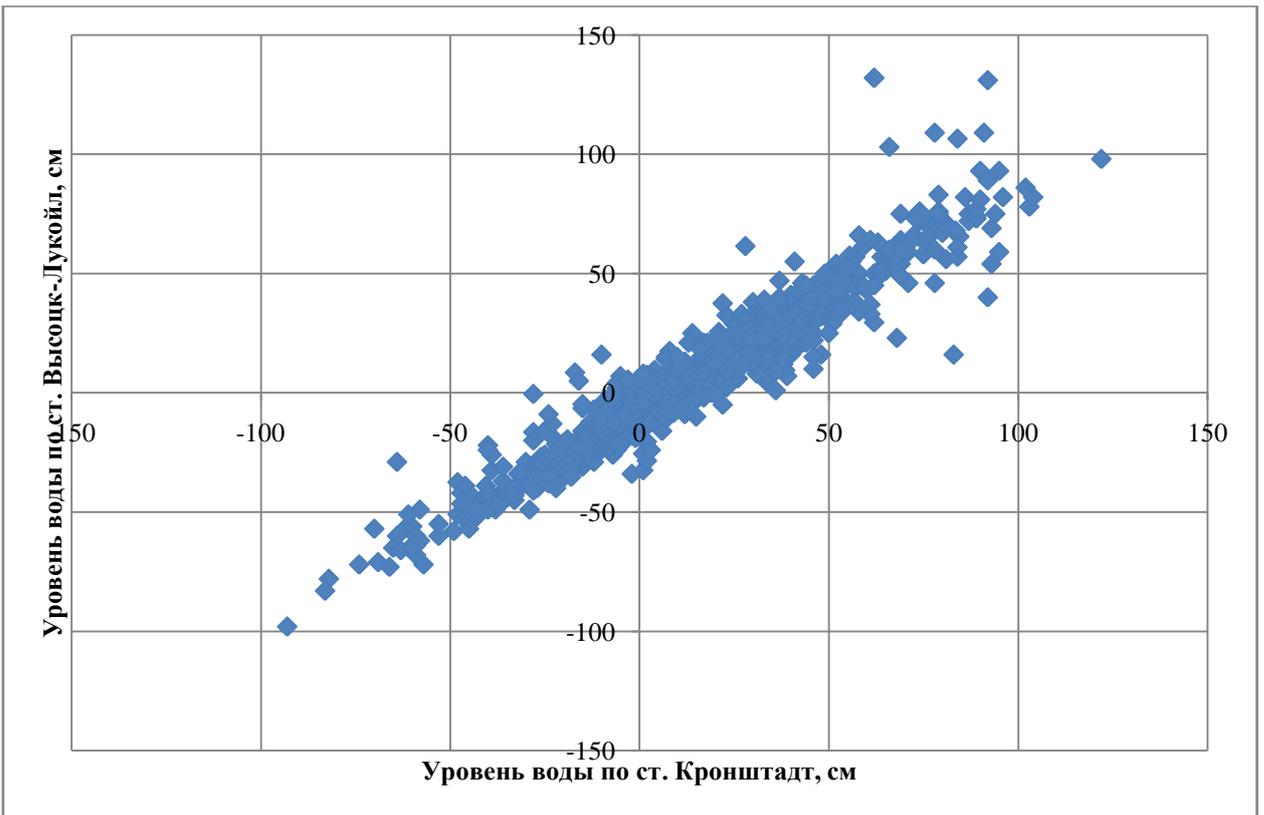
1. Грибанов Ю. И., Мальков В.Л. Спектральный анализ случайных процессов 1974.
2. Кайсл Ч. Анализ временных рядов гидрологических данных. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 139 с.
3. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. – М.: Наука, 1968. – 463 с.
4. Давенпорт В.Б., Рут В.Л. Введение в теорию случайных сигналов и шумов. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. – 467 с.
5. Картвелишвили Н.А. Стохастическая гидрология. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 165 с.
6. Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA. – М.: Горячая линия-Телеком, 2016. – 288 с.
7. Шихов А.Н., Черепанова Е.С., Пономарчук А.И. Геоинформационные системы: применение гис-технологий при решении гидрологических задач: Практикум. – Пермь, 2014. – 98 с.
8. Казакевич Д.И. Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 319 с.
9. Кузнецов Ю.В., Баев А.Б. Спектральный и временной анализ импульсных и периодических сигналов: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2007. – 95 с.
10. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Выпуск 1. – М.: Мир, 1971. – 317 с.
11. Белоцерковский А.В. Спектральный анализ в гидрометеорологии. Учебное пособие. – Л.: Изд-во РГГМИ, 1993. – 64с.

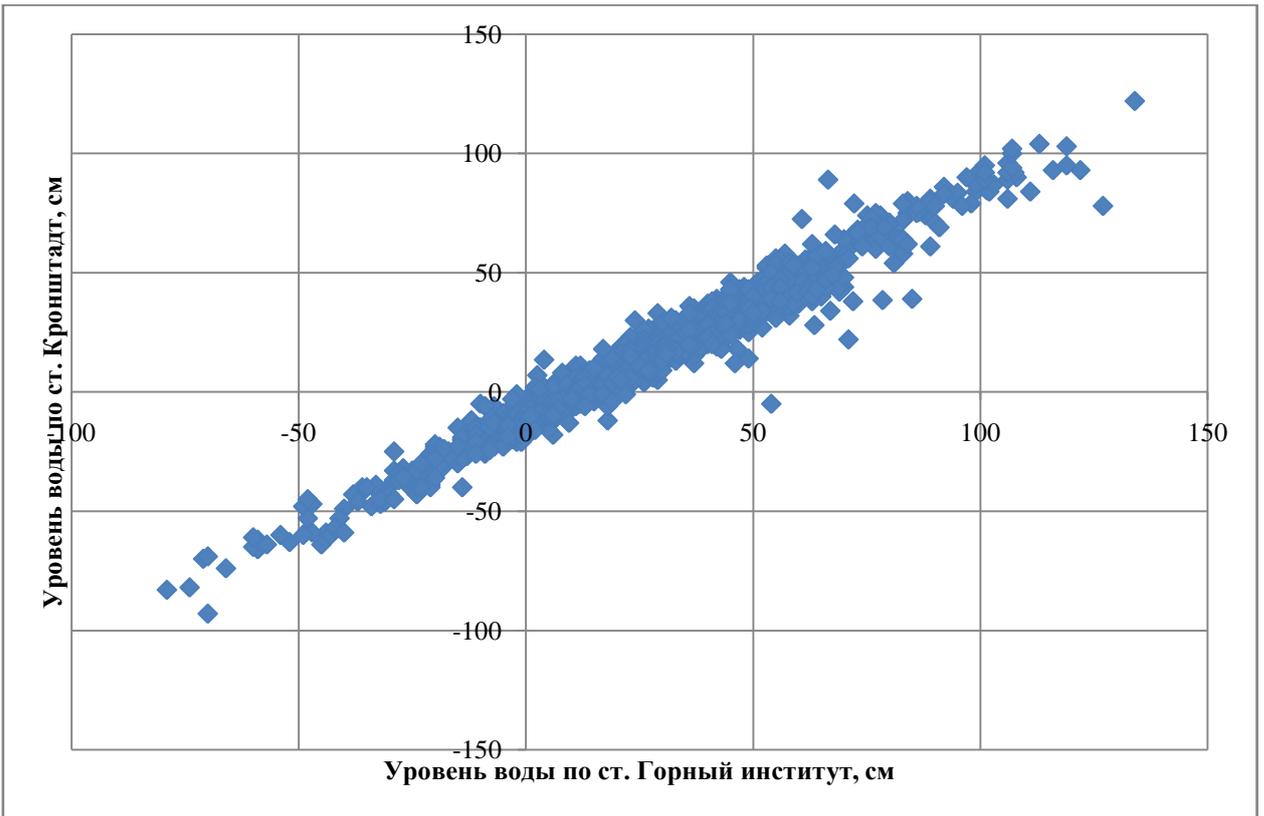
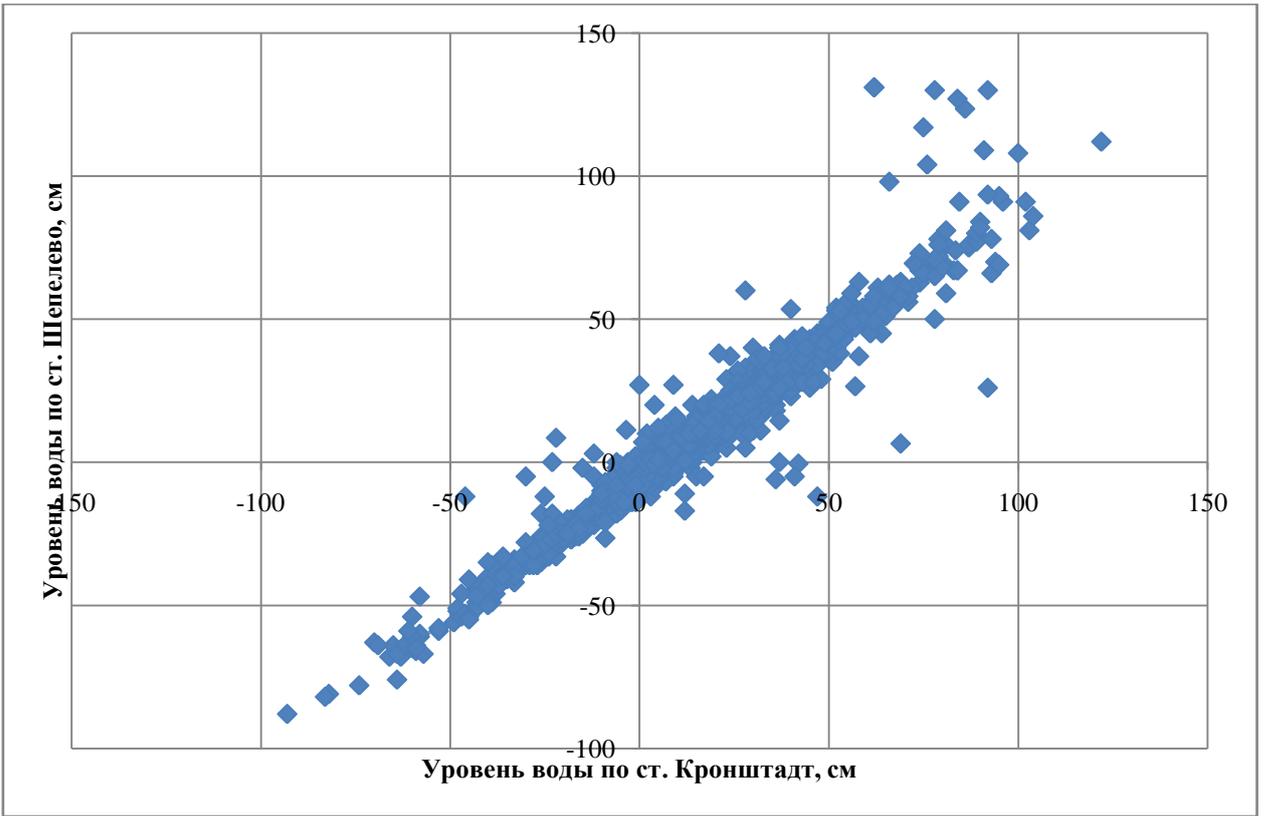
ПРИЛОЖЕНИЕ А

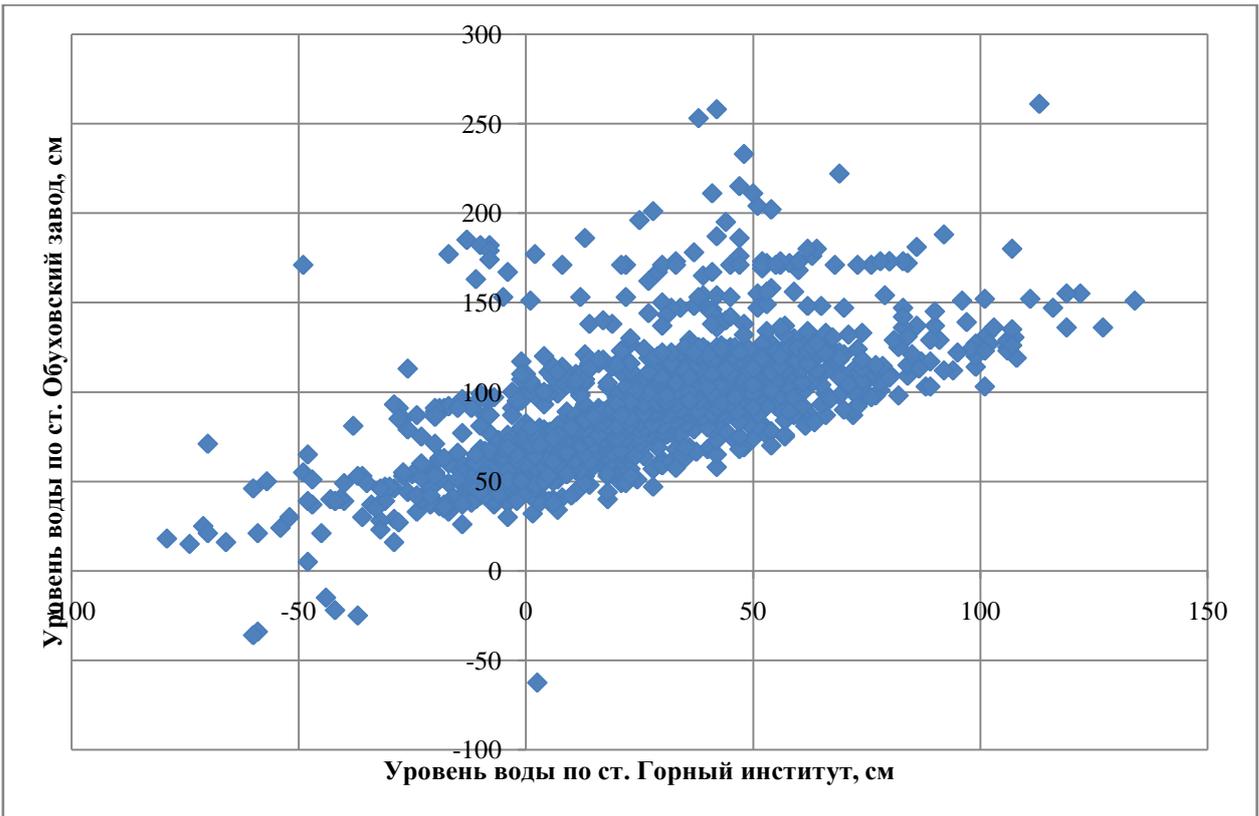
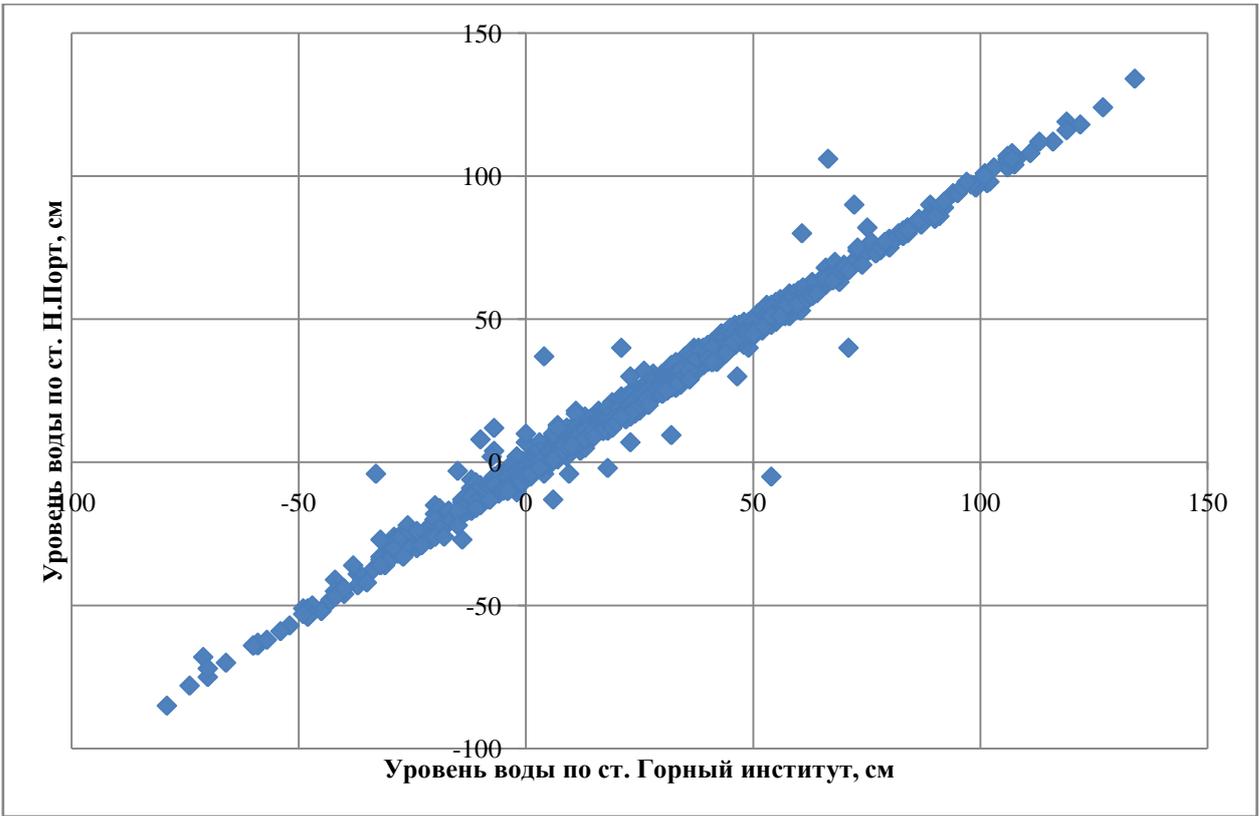
Графики связи уровней воды по двум постам

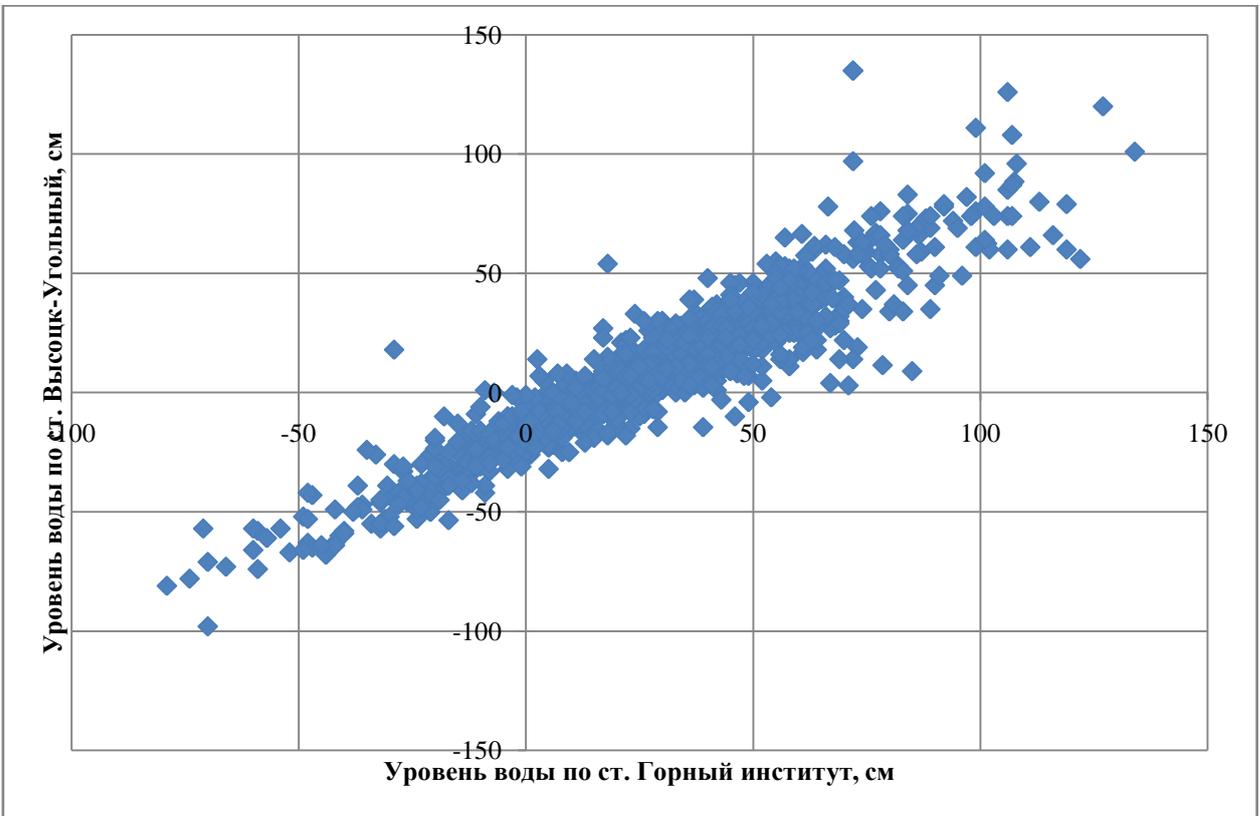
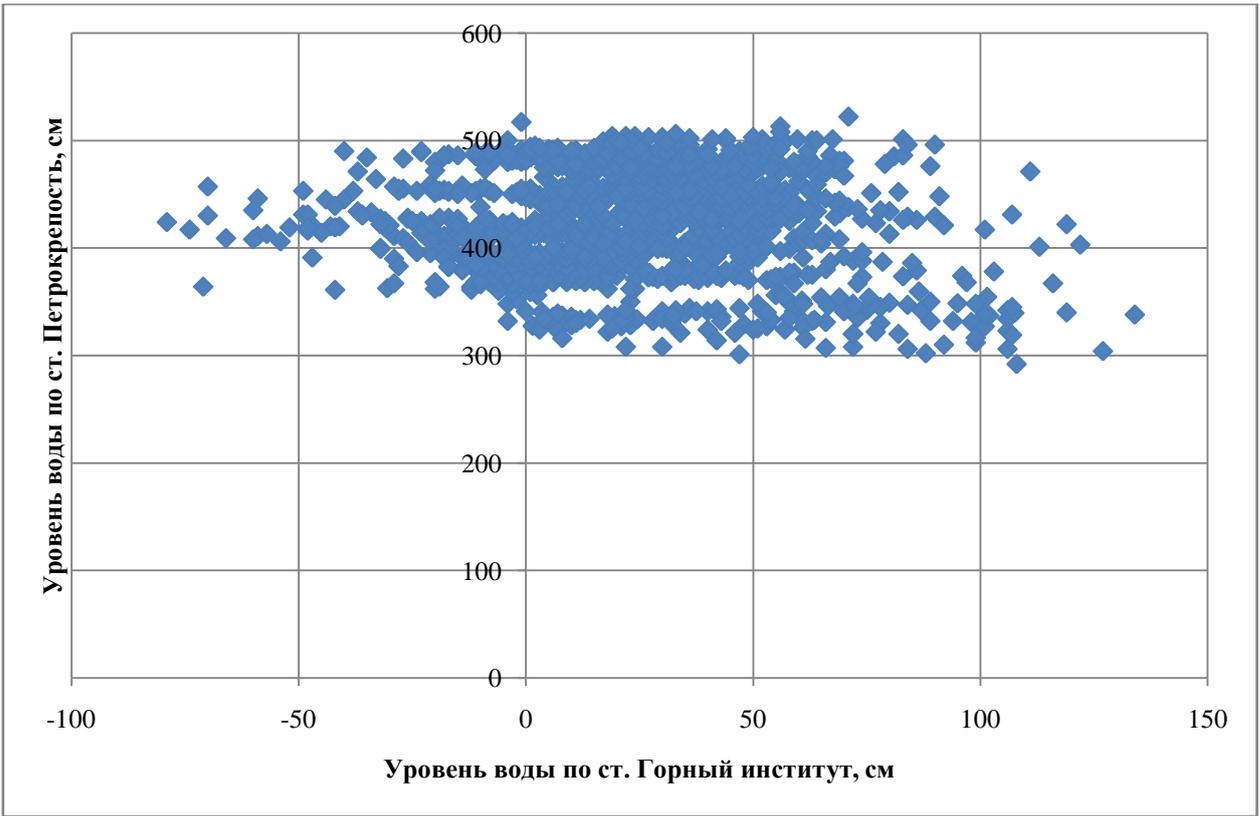


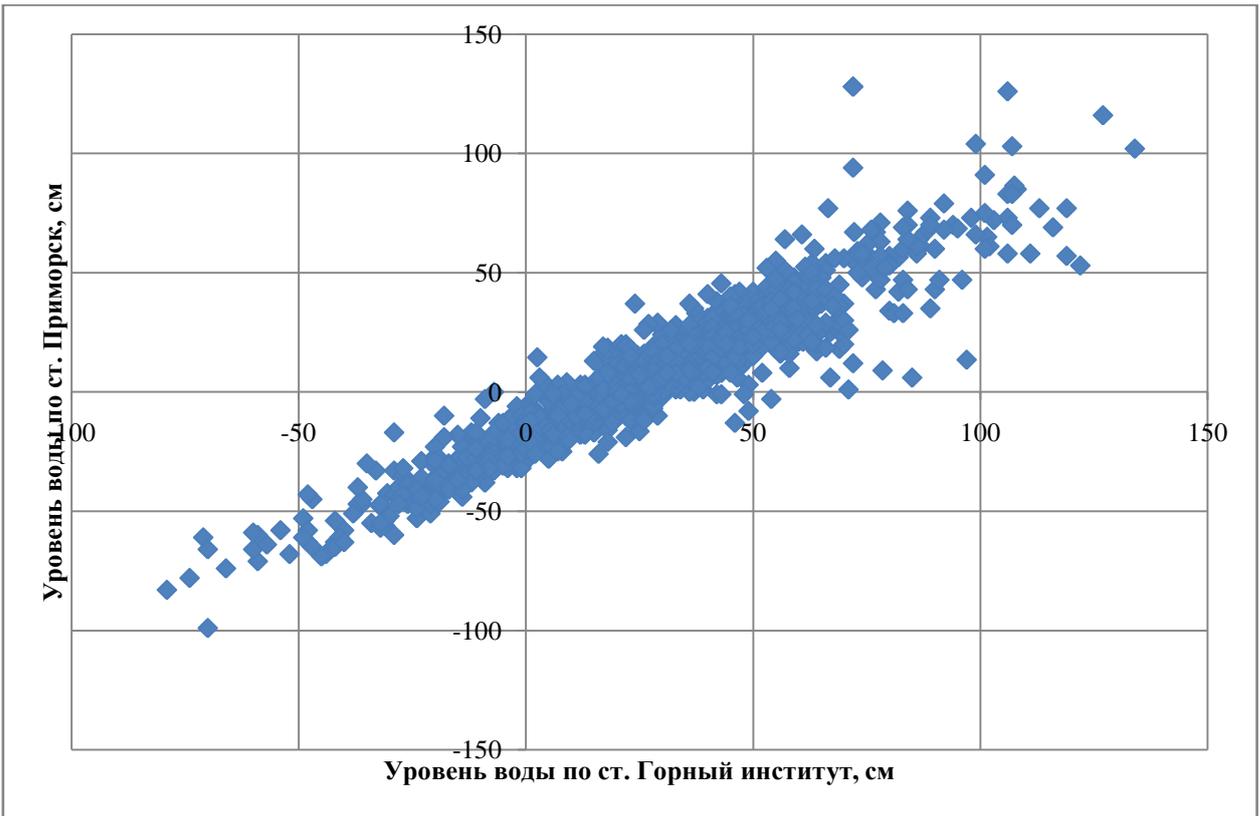
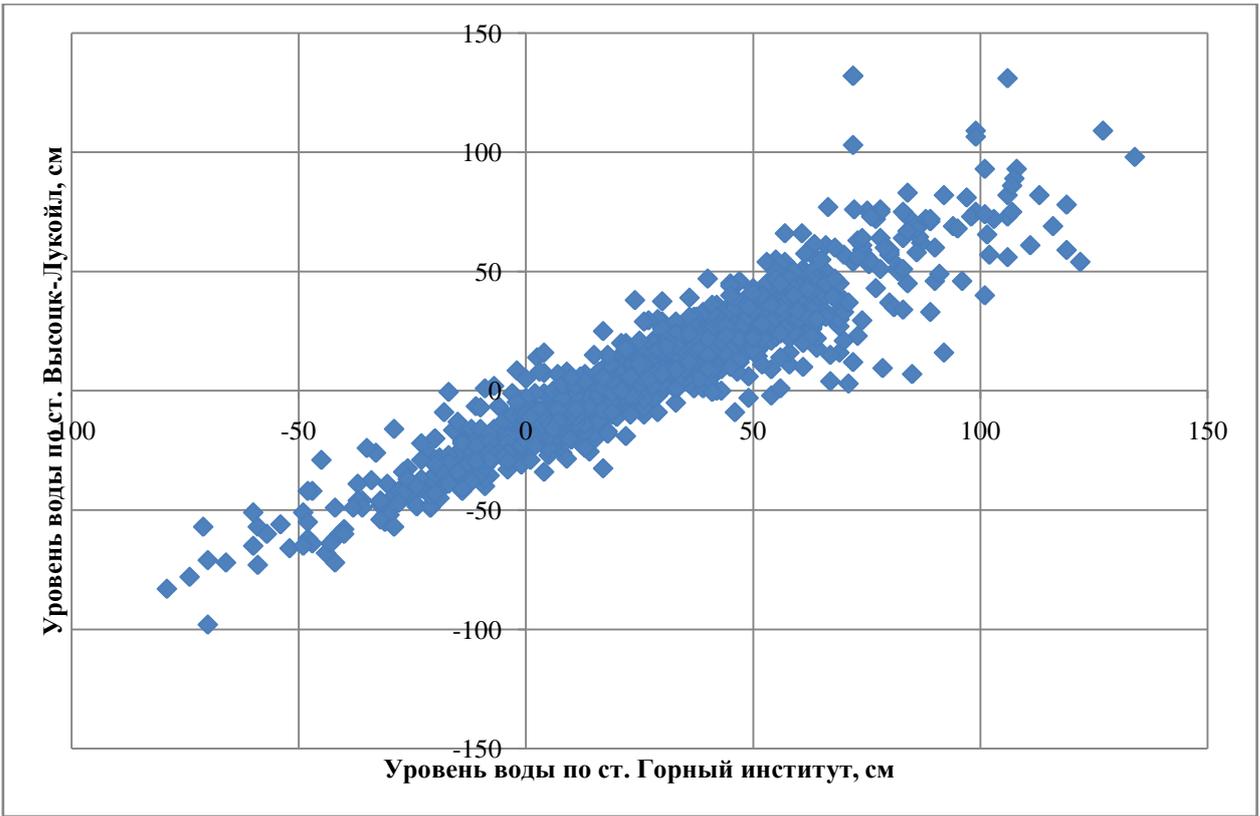


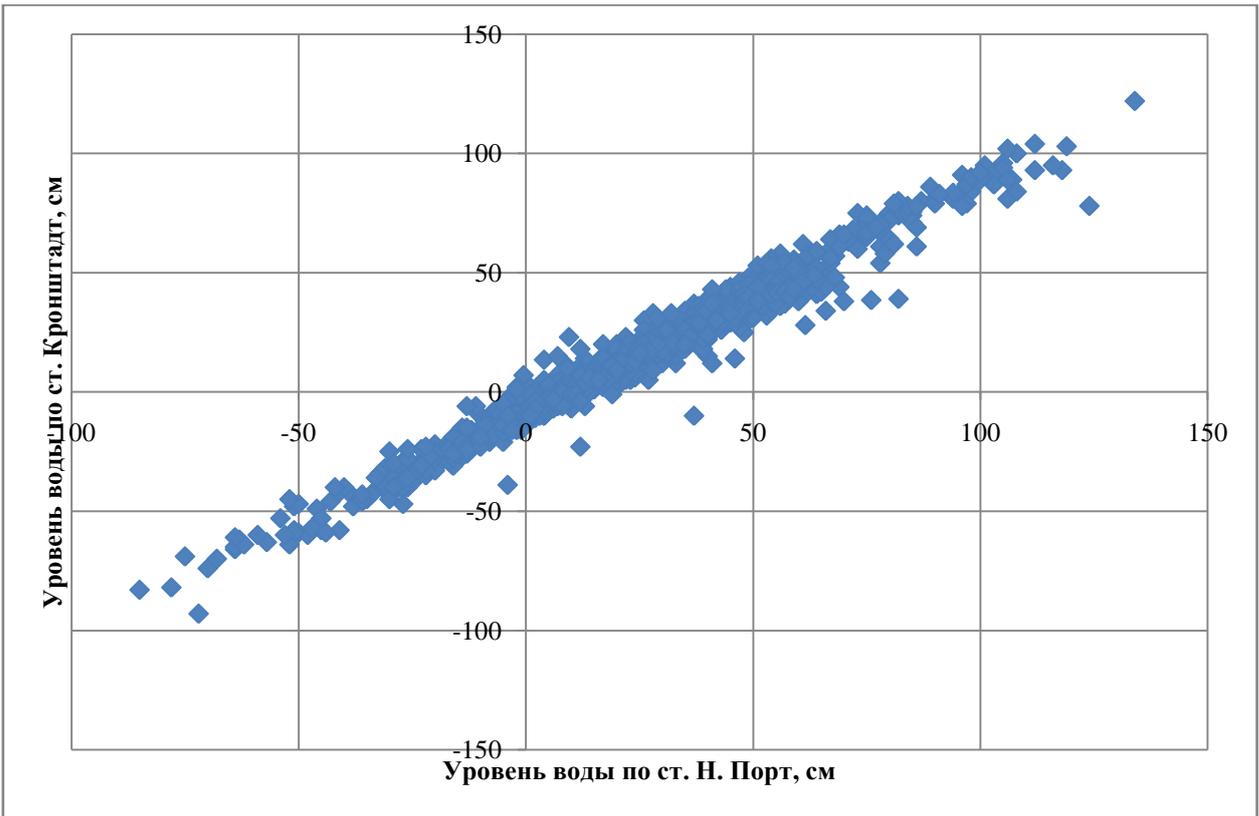
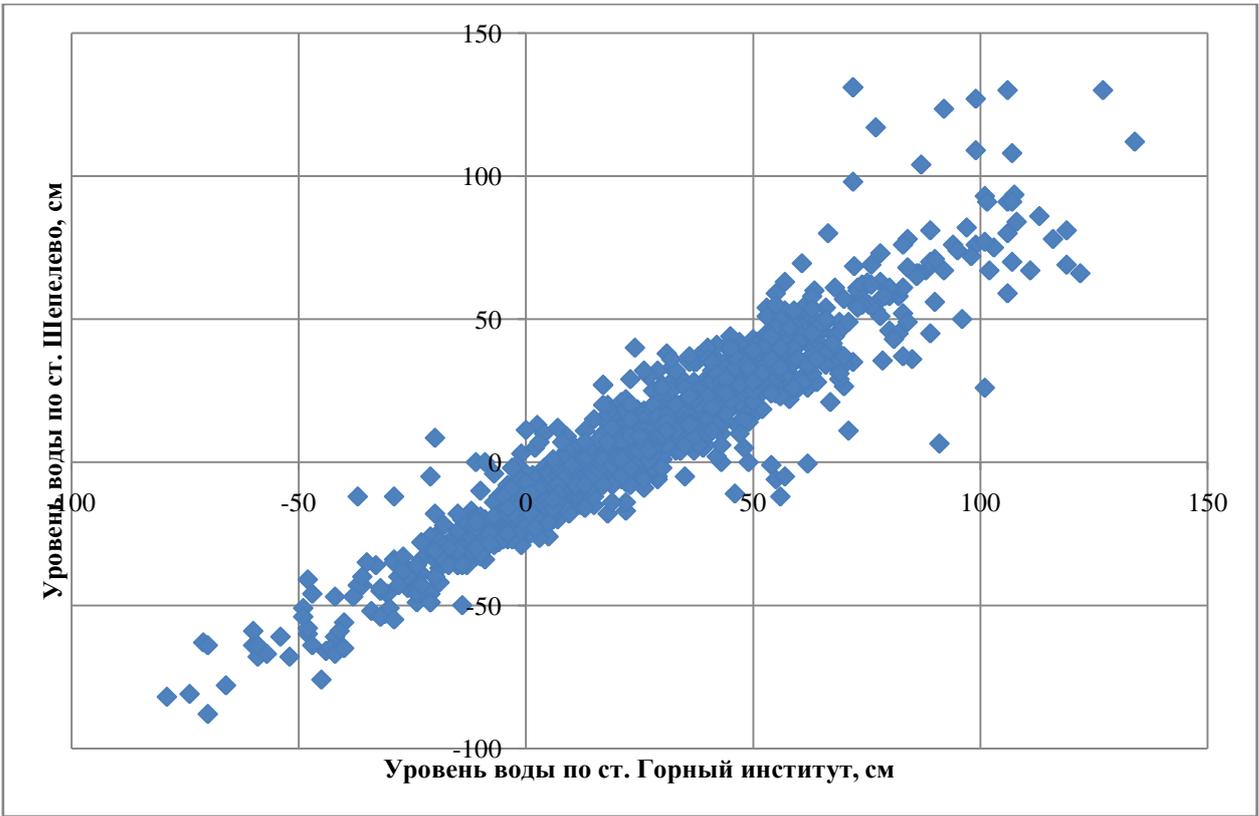


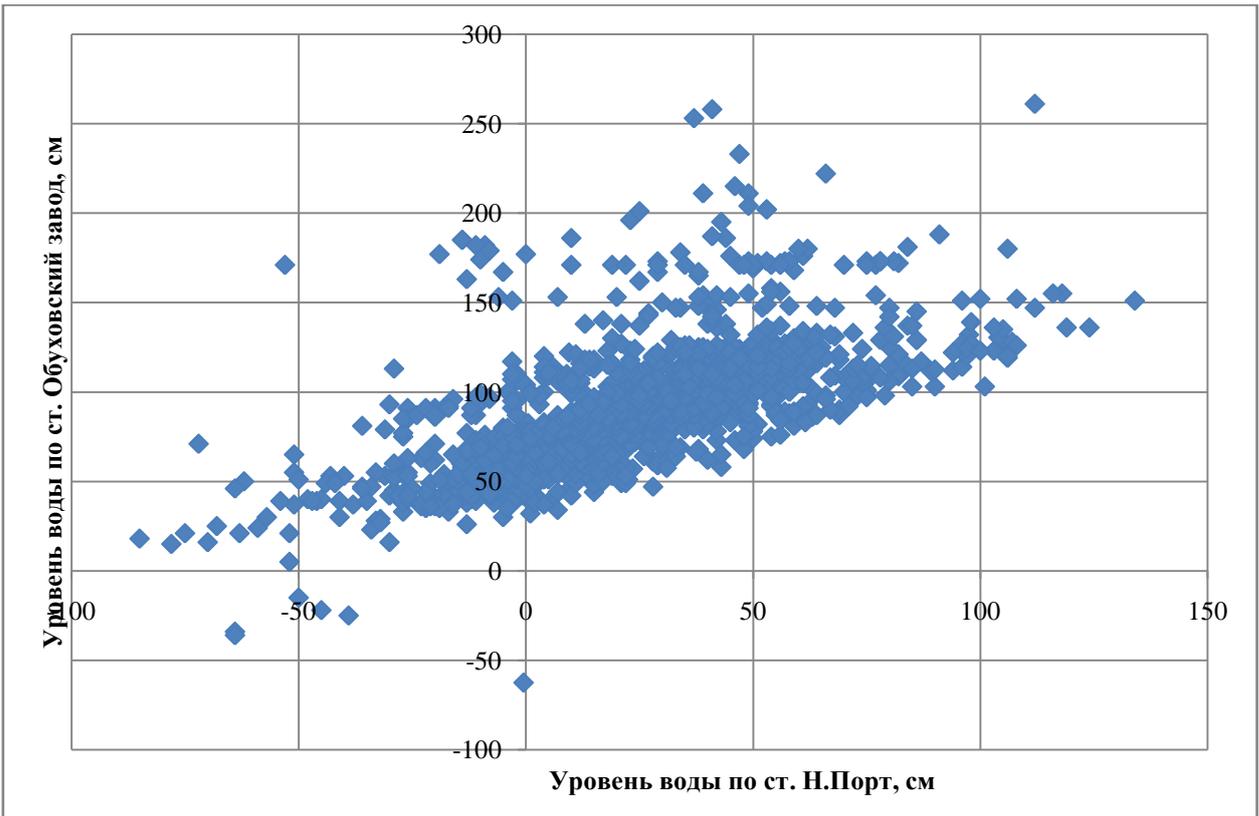
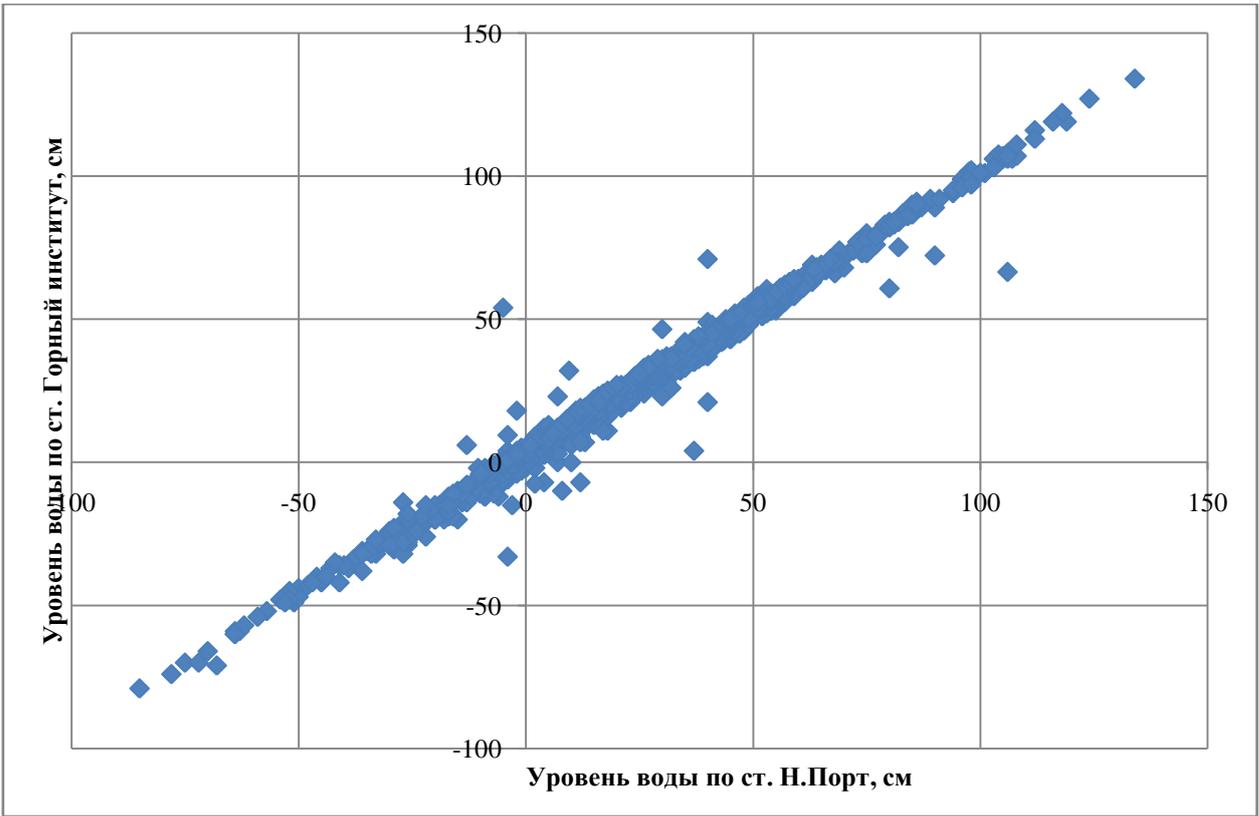


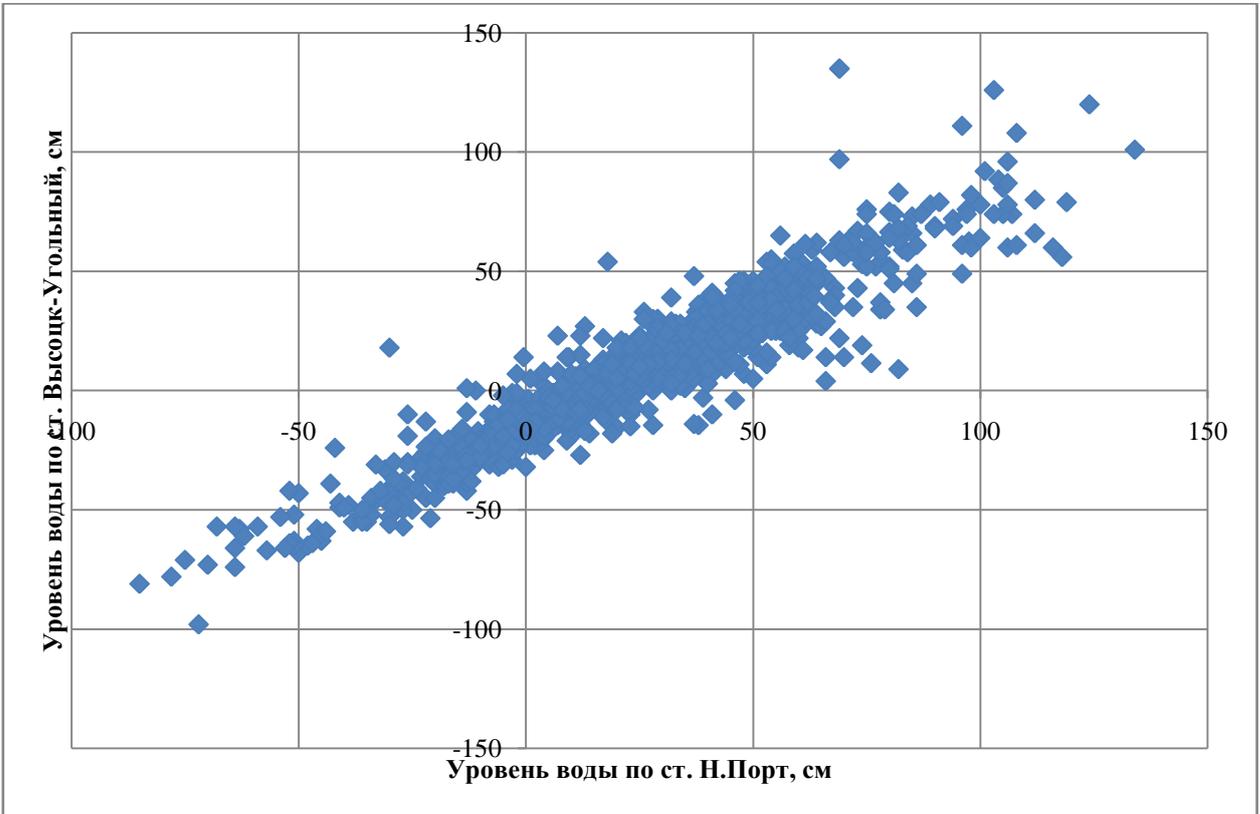
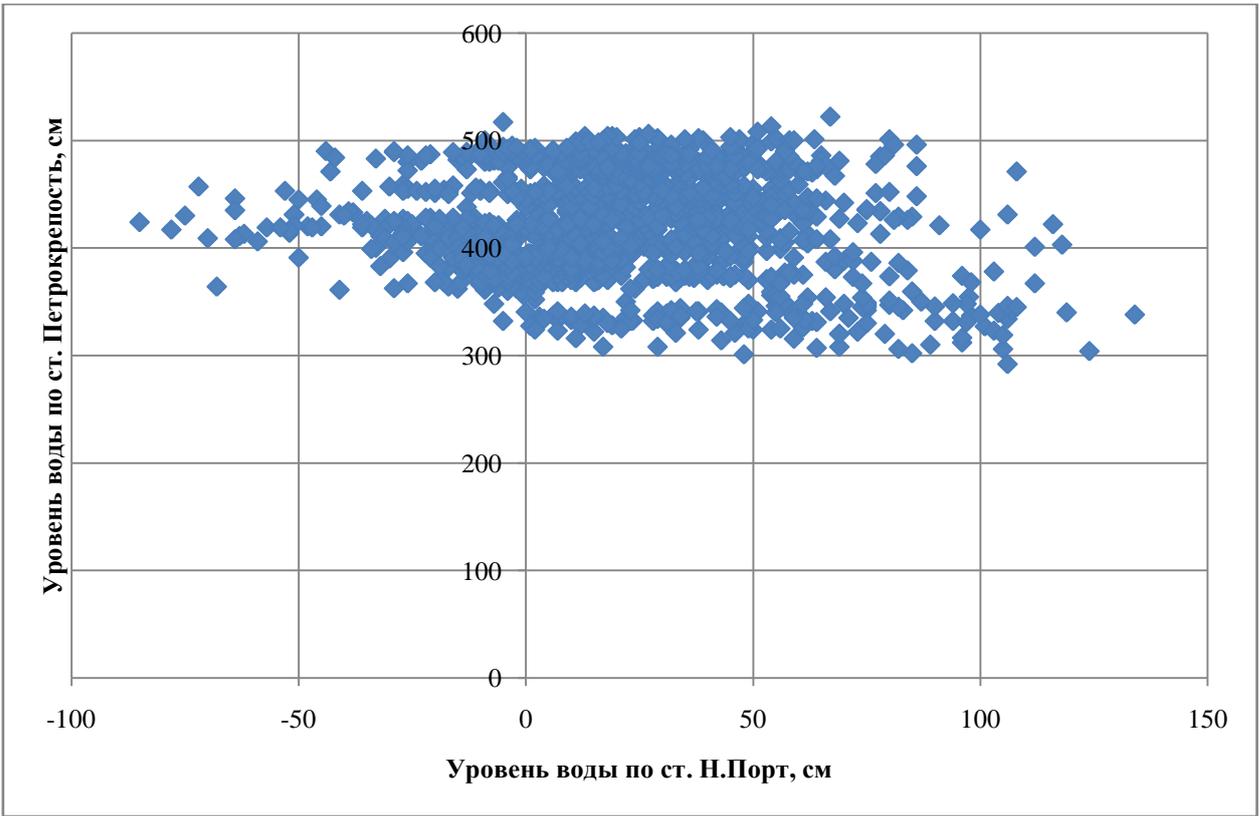


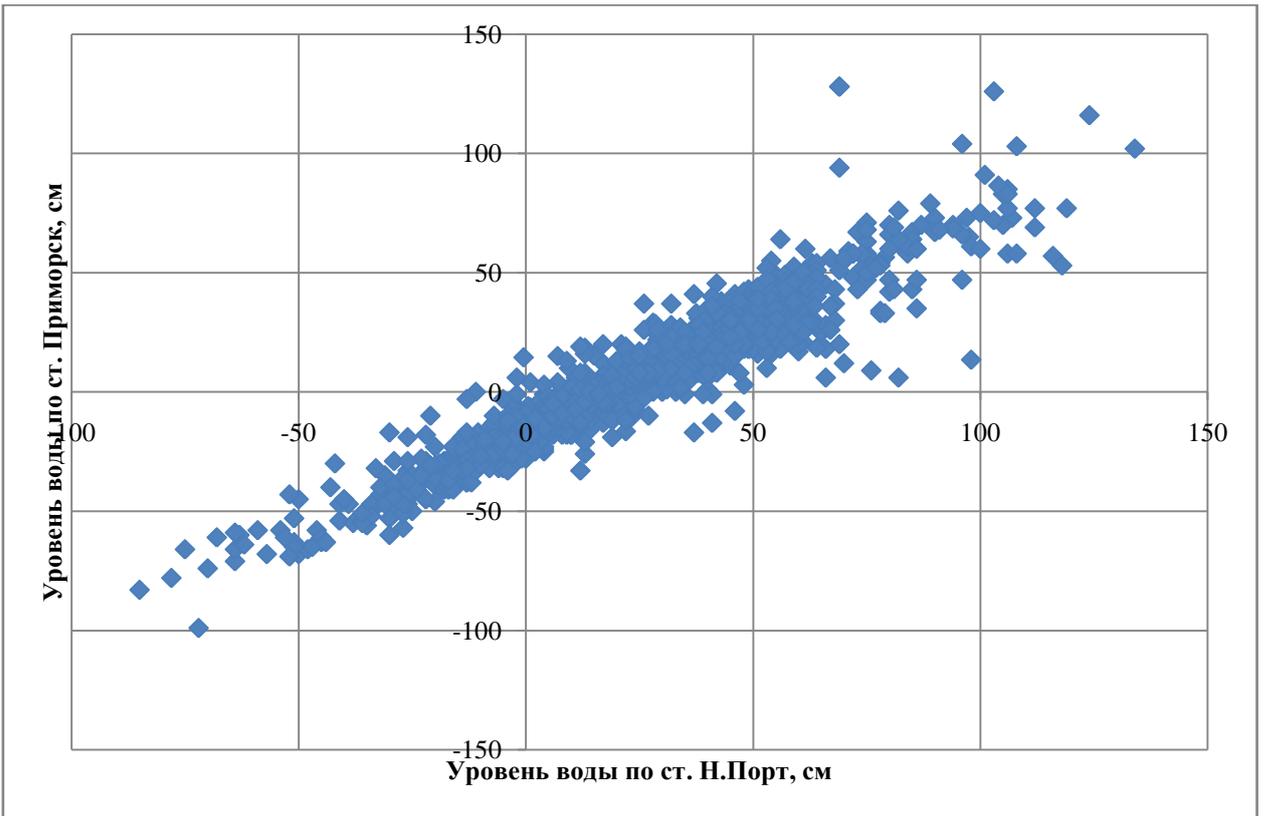
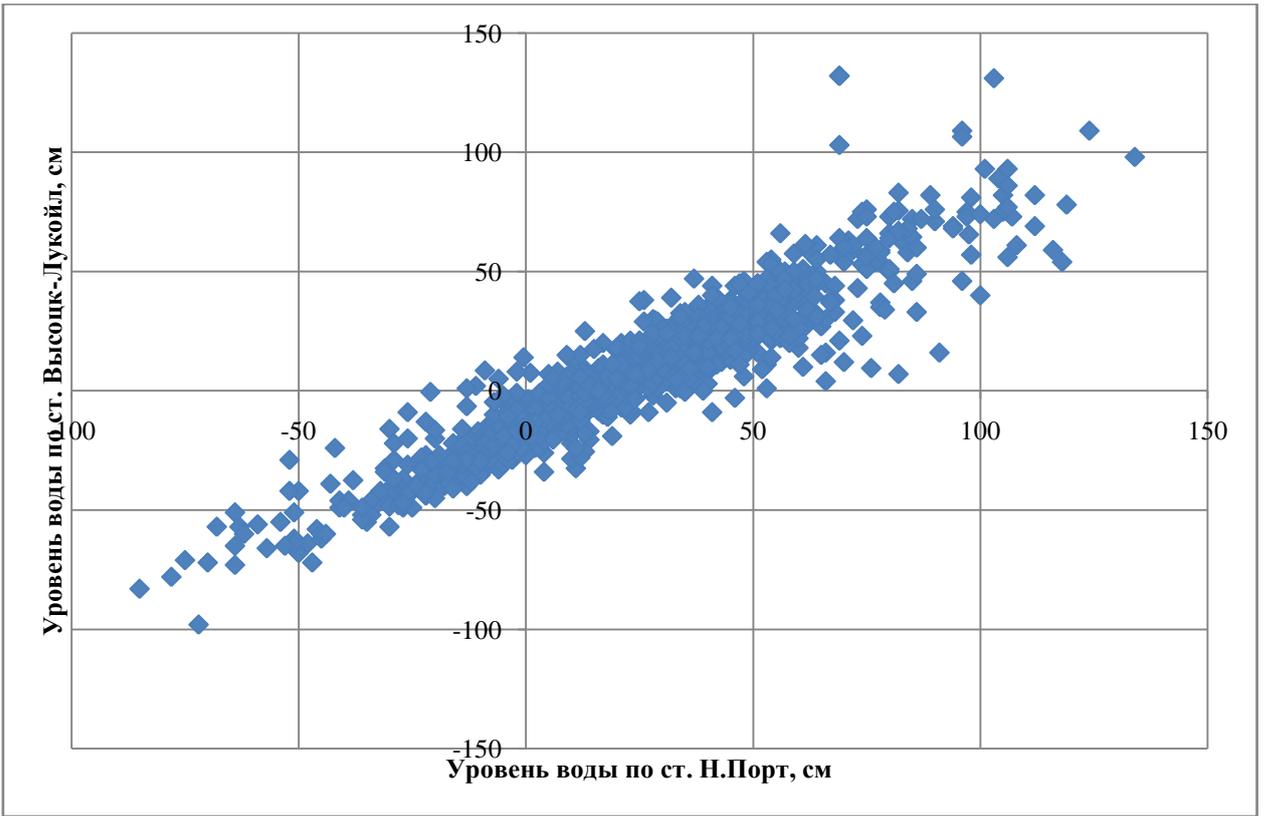


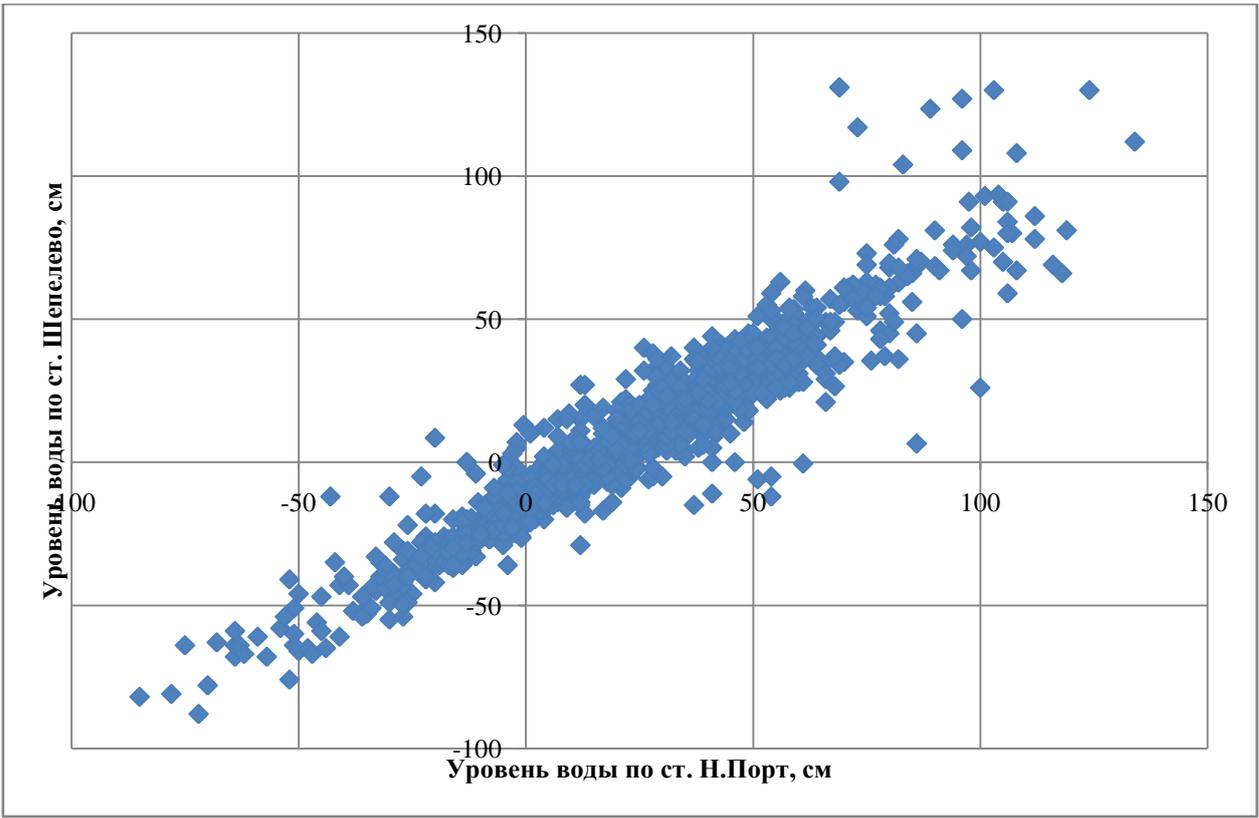


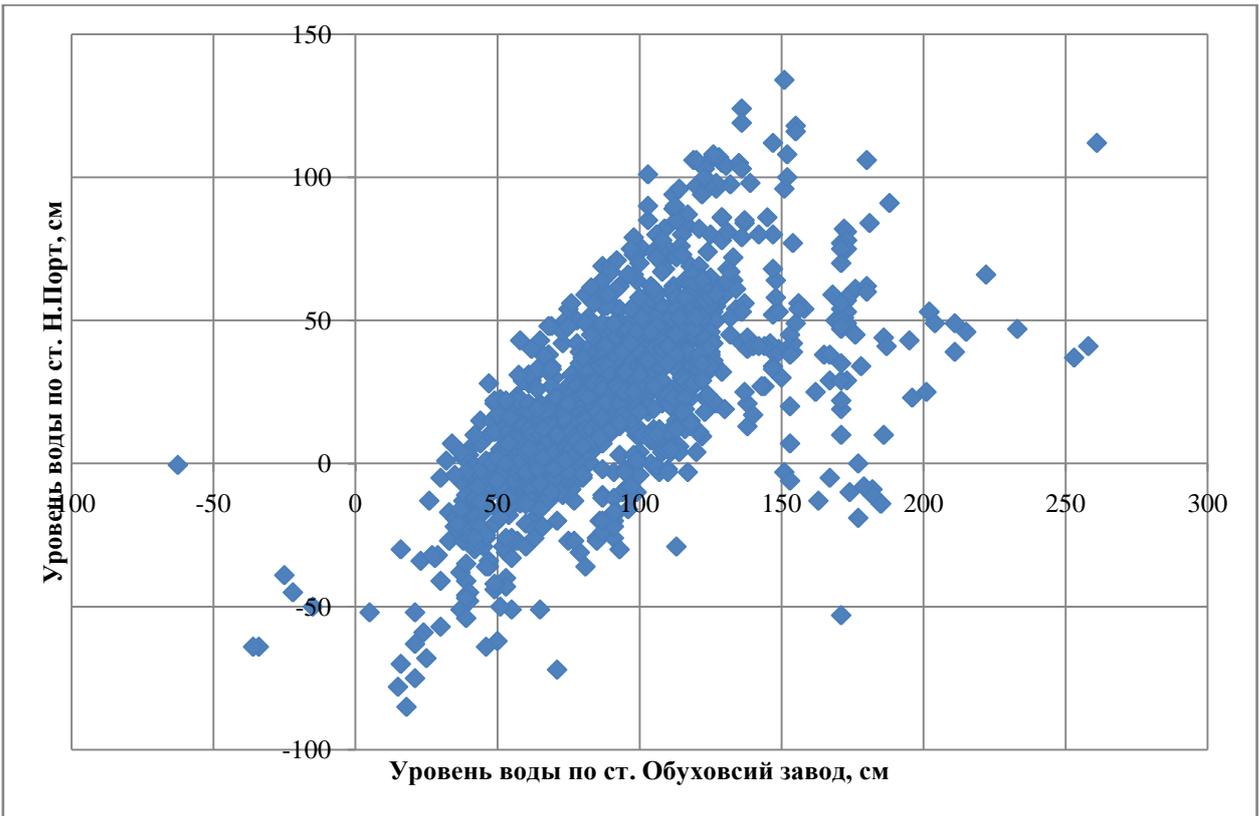
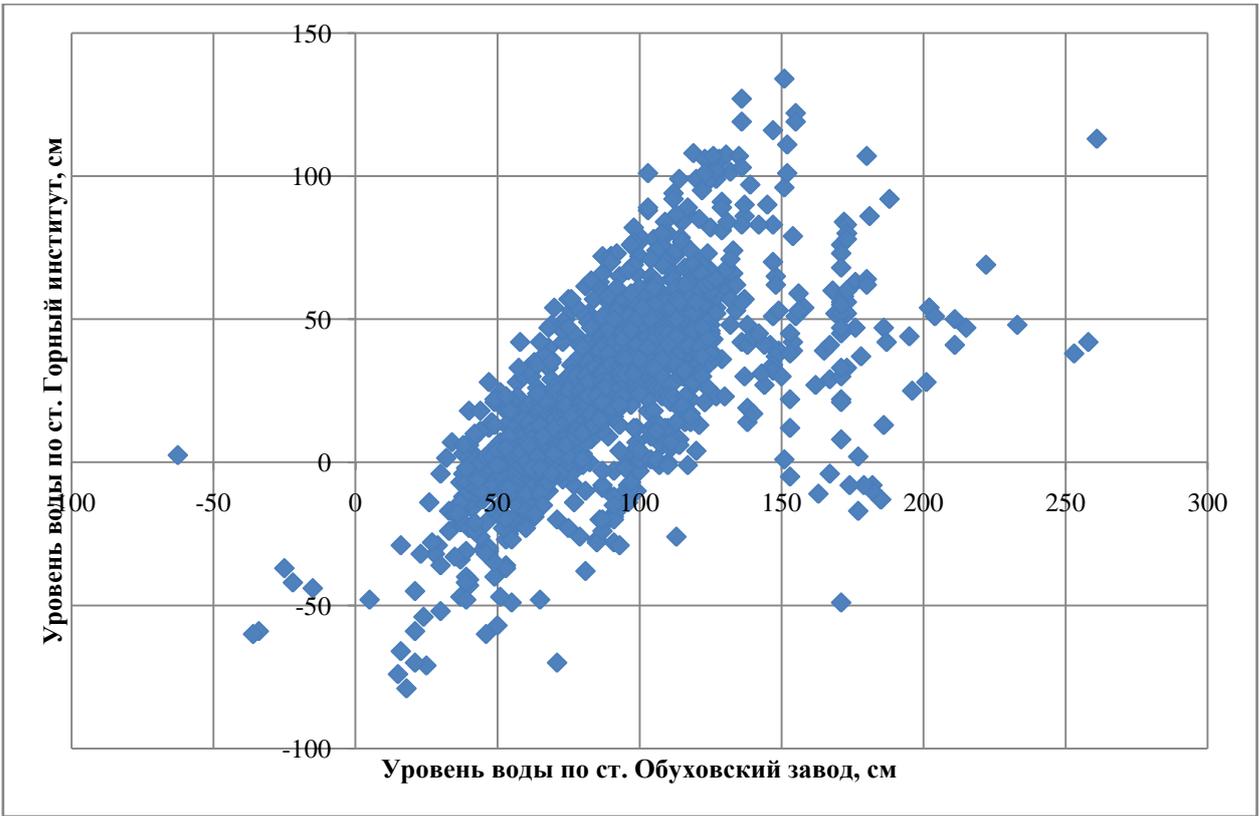


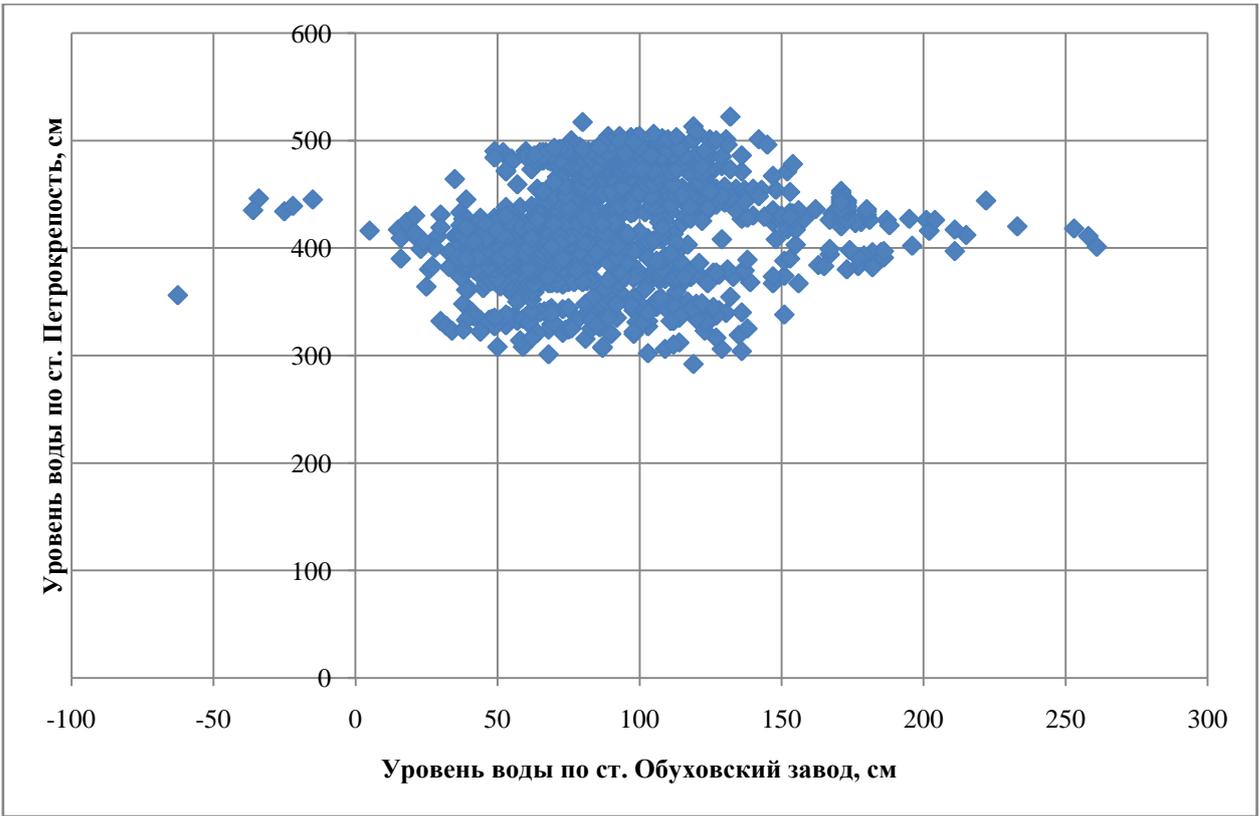


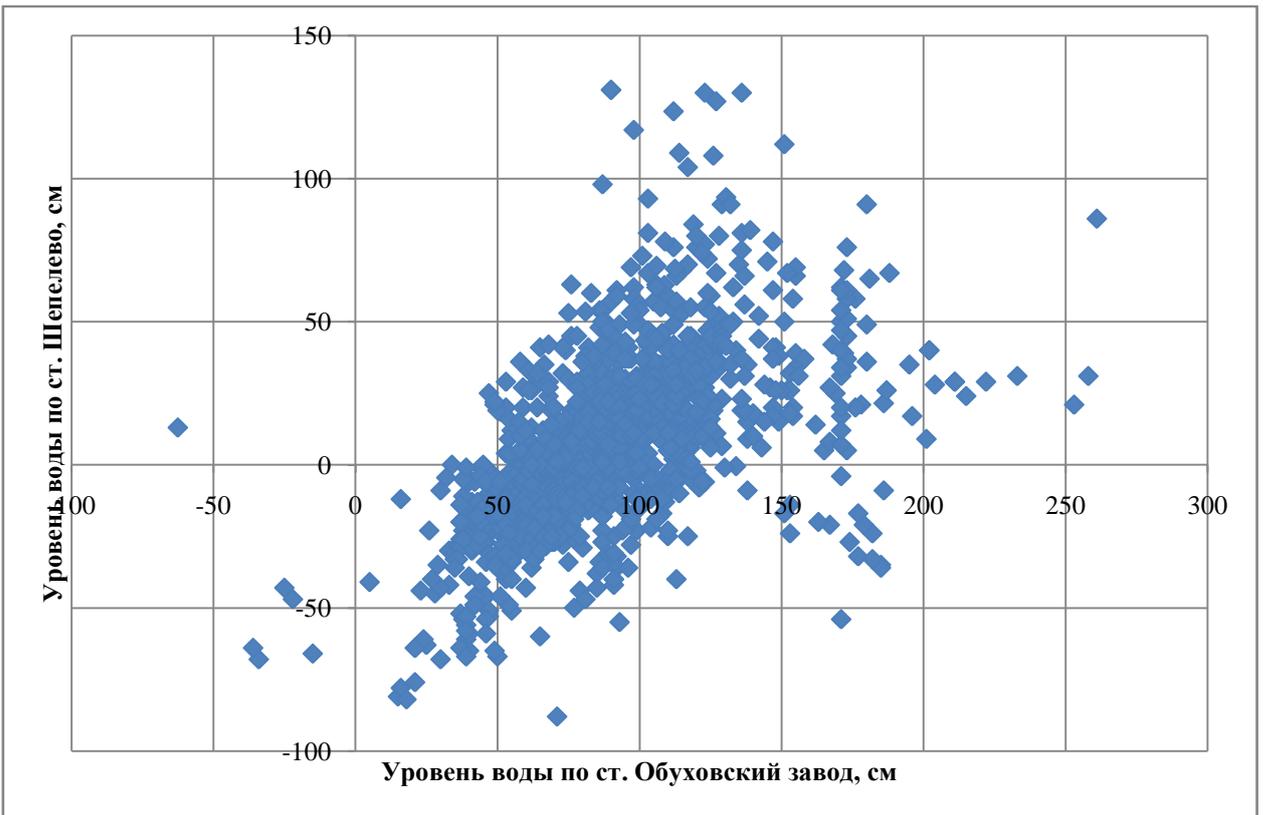
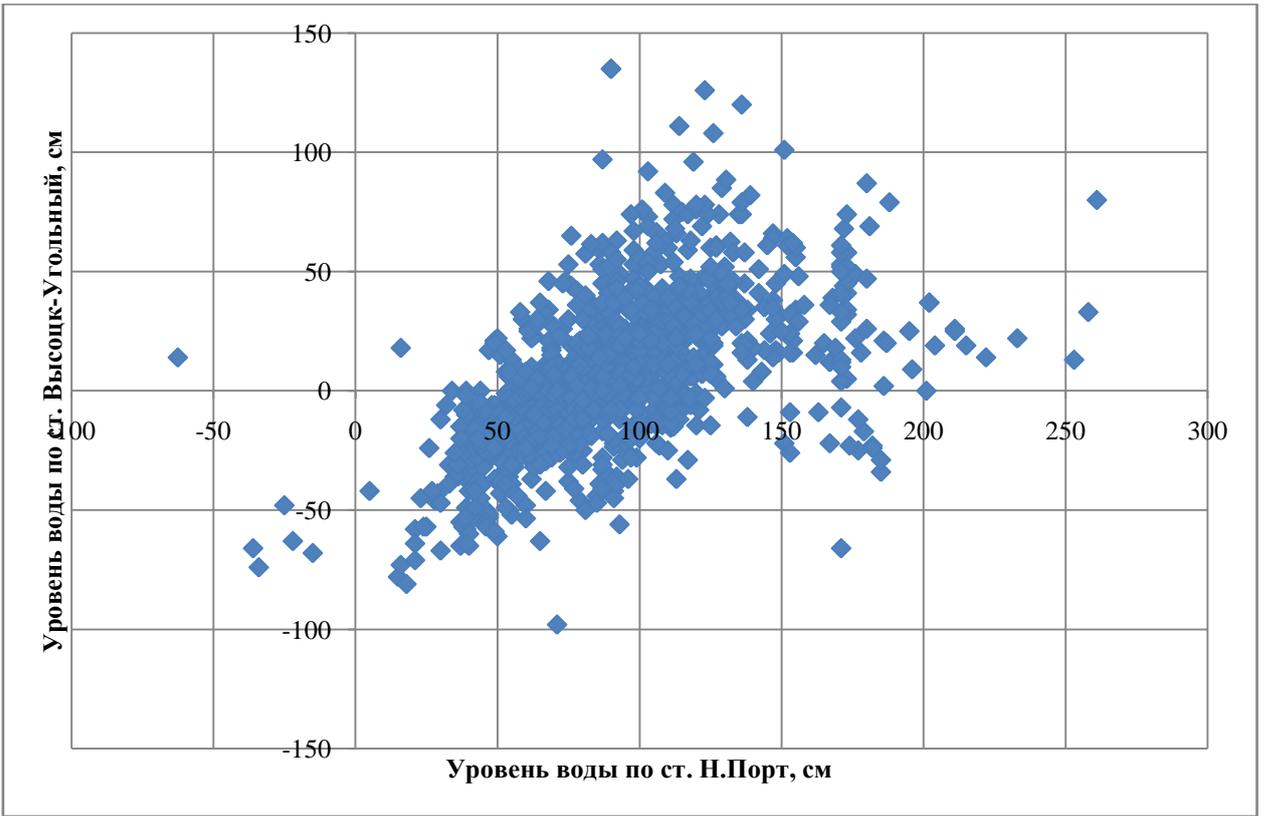


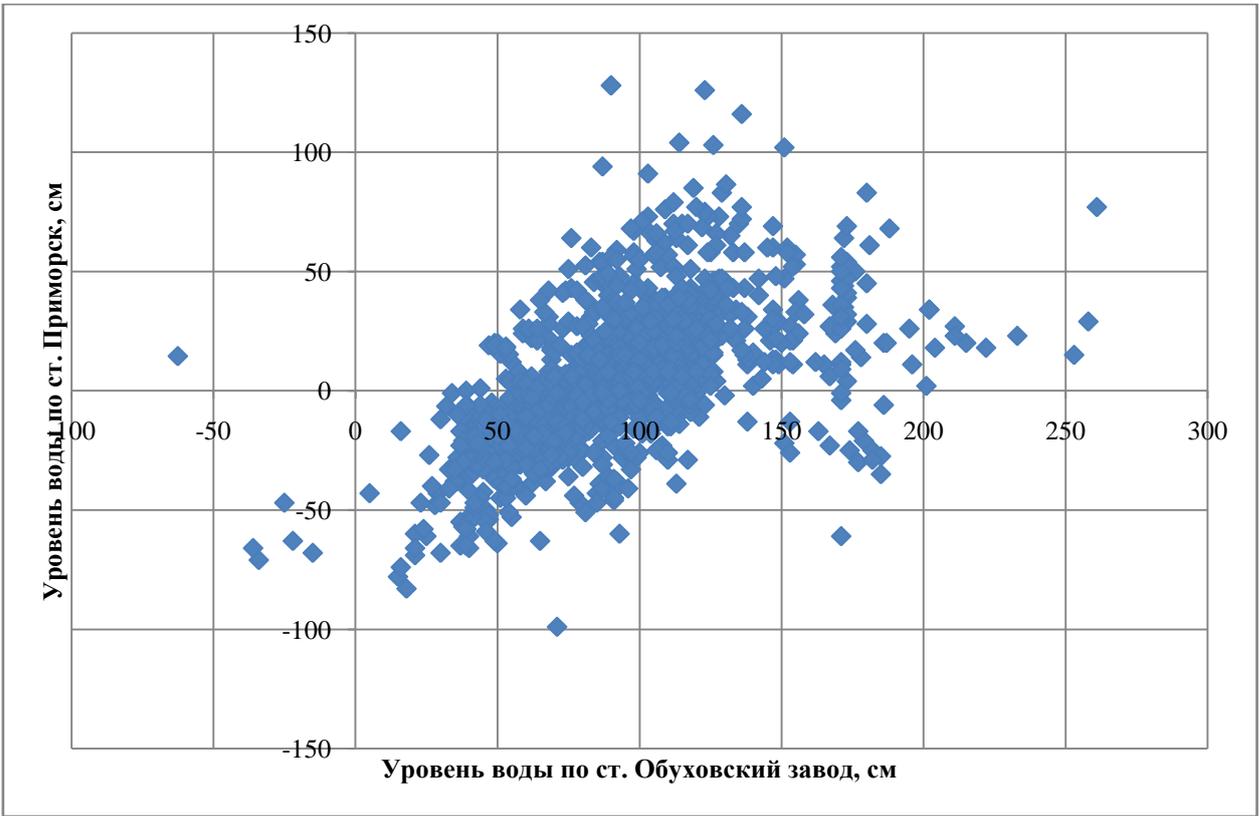


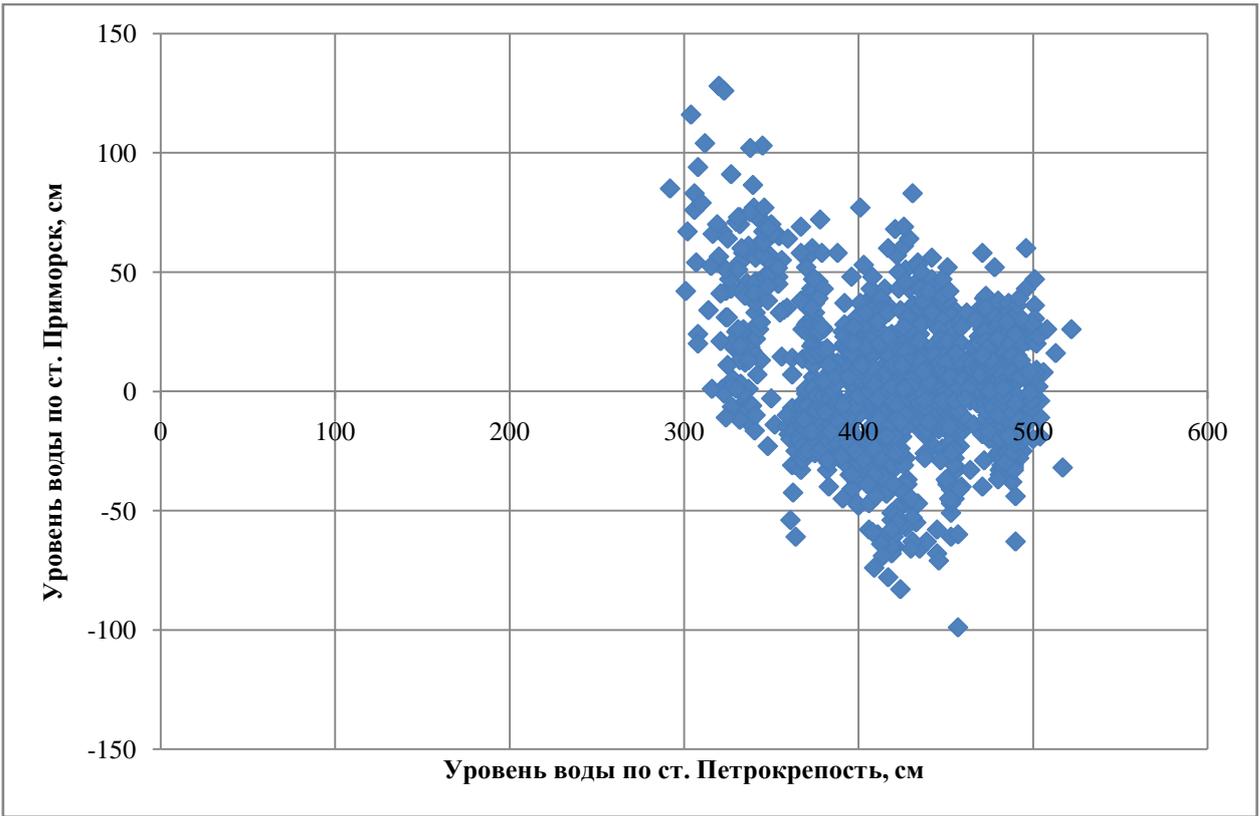


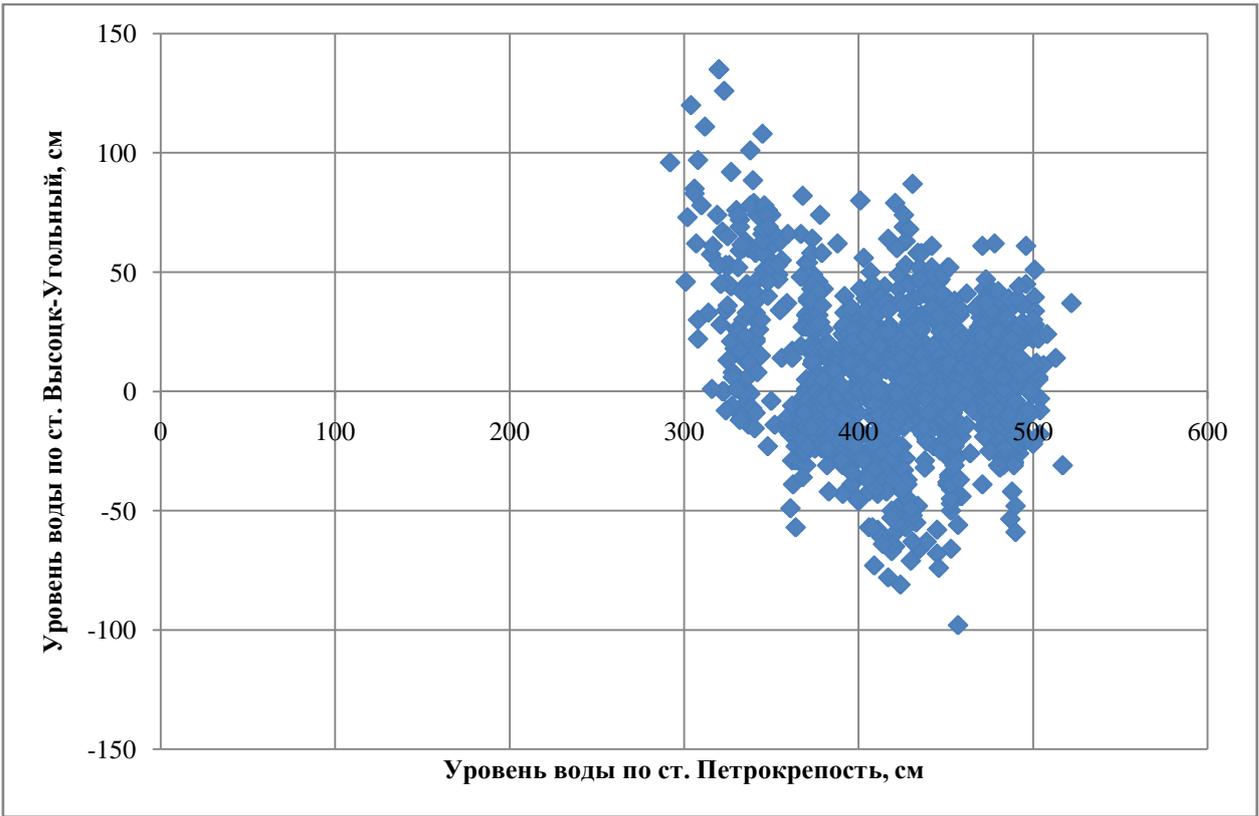
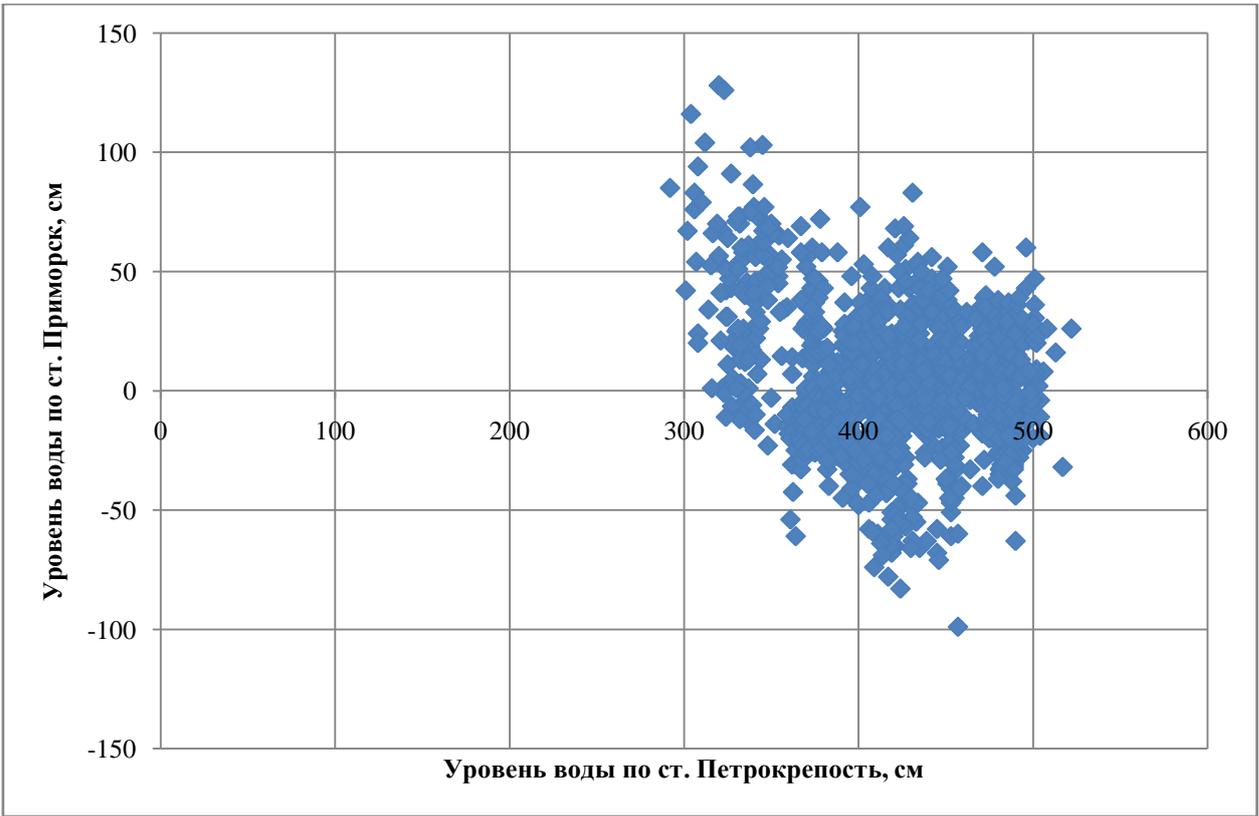


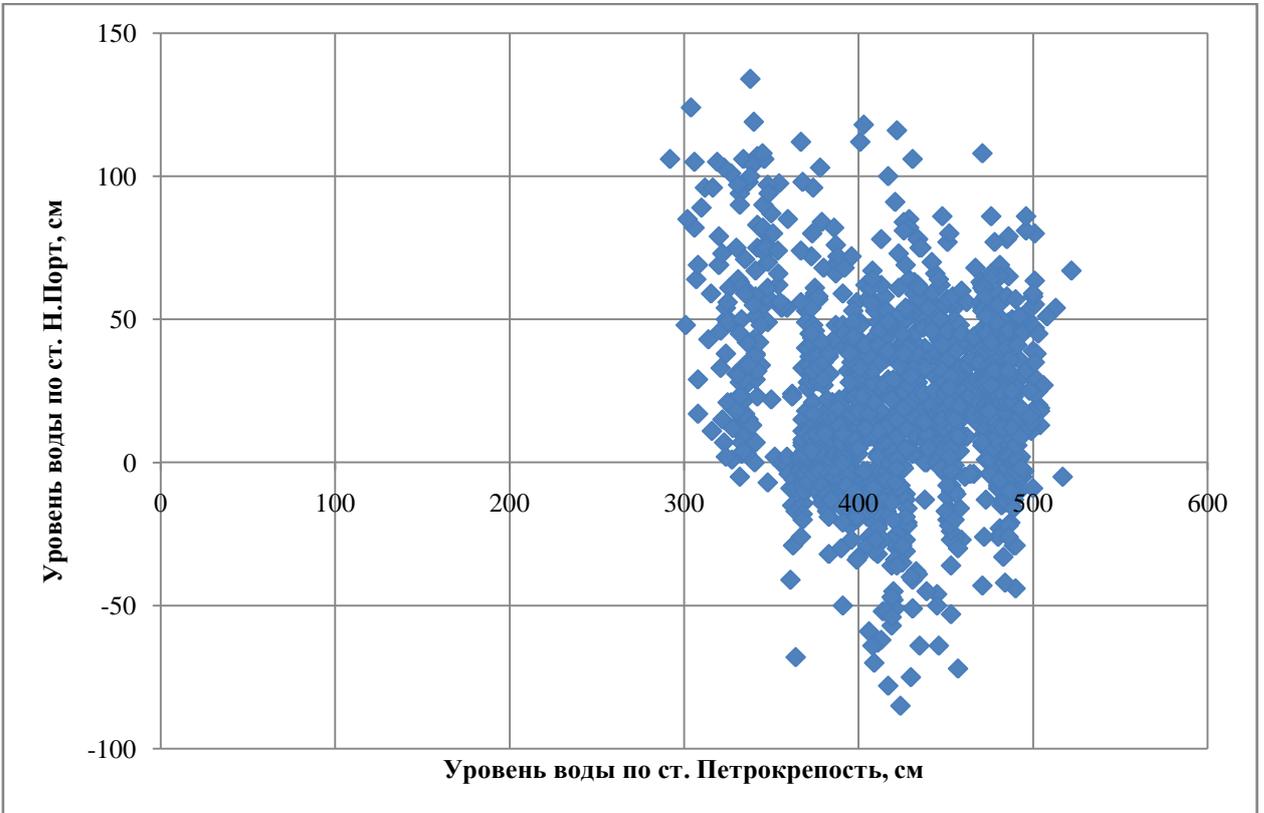


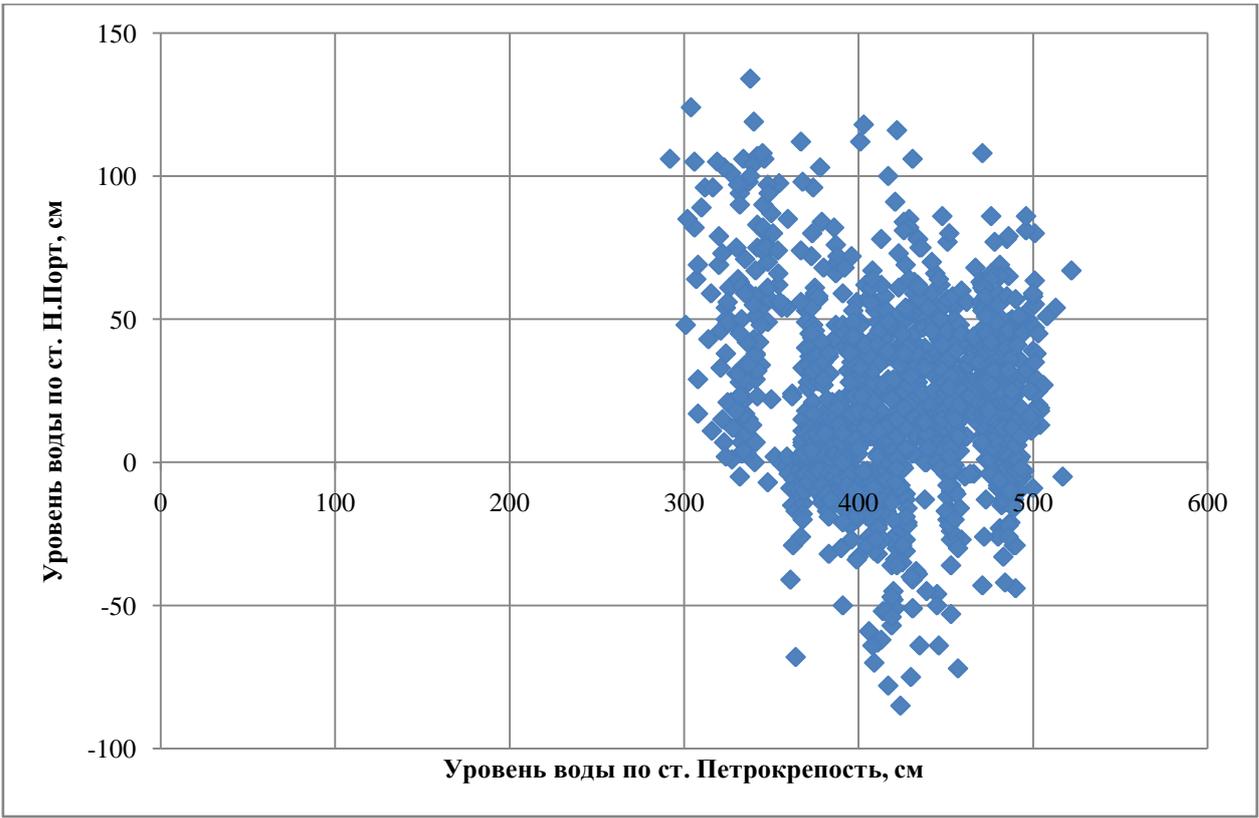












ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Графики спектральной плотности по постам

