



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

Кафедра Гидрологии суши

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(дипломный проект)

На тему **Влияние речного стока на режим
солености устьевой области реки
Северная Двина**

Исполнитель Беляева Наталья Германовна

Руководитель доктор географических наук, профессор

Мякишева Наталья Вячеславовна

**«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой**

(подпись)

канд. геогр. наук. Сикан Александр Владимирович

«__»_____20__г.

Санкт–Петербург
2016

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

	Введение	5
1	Общая характеристика устьевой области реки Северная Двина	8
1.1	Краткая характеристика бассейна реки Северная Двина	8
1.2	Краткая характеристика Белого моря	11
1.3	Рельеф и почвы	15
1.4	Гидрография	20
2	Речной сток	26
2.1	Многолетние колебания речного стока	28
2.2	Внутригодовые колебания речного стока	43
3	Режим солёности устьевой области р. Северная Двина	55
3.1	Межгодовая изменчивость солёности	62
3.2	Внутригодовая изменчивость солёности	87
4	Влияния речного стока на режим солёности вод устьевой области р. Северная Двина	101
	Заключение	111
	Список использованных источников	117
	Приложение А	119
	Таблица А.1 — Внутригодовое распределение стока реки Северная Двина у с. Усть-Пинега в характерные годы	119
	Приложение Б	120
	Таблица Б.1 — Среднемесячные и среднегодовые расходы воды р. Северная Двина – г.п. Усть-Пинега	120
	Таблица Б.2 — Среднемесячные и среднегодовые расходы воды р. Северная Двина – г.п. Абрамково	122
	Таблица Б.3 — Среднемесячные и среднегодовые расходы воды р. Северная Двина – г.п. Звоз	123

Приложение В	126
Таблица В.1 — Ординаты автокорреляционной функции средне-месячных расходов воды	126
Приложение Г — Расчет вероятностных характеристик внутри-годовой изменчивости речного стока для каждого месяца года	128
Таблица Г.1— Оценка математического ожидания $m(t)$ и дисперсии $D(t)$	128
Приложение Д	130
Таблица Д.1 — Ординаты автокорреляционной функции средне-месячных расходов воды	130
Приложение Е	133
Таблица Е.1— Среднемесячные и среднегодовые значения солёности – МГ-2 о. Мудьюг	133
Таблица Е.2— Среднемесячные и среднегодовые значения солёности – МГ-2 Зимнегорский маяк	135
Таблица Е.3— Среднемесячные и среднегодовые значения солёности – МГ-2 г. Северодвинск	136
Приложение Ж	138
Таблица Ж.1 — Значения солёности на разрезе пр. Маймакса М.В. станция №7 д. Чижовка (поверхность)	138
Таблица Ж.2 — Значения солёности на разрезе пр. Маймакса П.В. станция №7 д. Чижовка (поверхность)	139
Таблица Ж.3 — Значения солёности на разрезе пр. Маймакса М.В. станция №7 д. Чижовка (дно)	140
Таблица Ж.4 — Значения солёности на разрезе пр. Маймакса П.В. станция №7 д. Чижовка (дно)	141
Приложение И	142
Таблица И.1 — Ординаты автокорреляционной функции среднемесячных значений солёности воды	142

ПРИЛОЖЕНИЕ К — Низкочастотная фильтрация Баттерворта по данным солености воды станции Зимнегорский маяк	144
Таблица К.1 — Среднемесячные значения солености за январь (0.57)	144
Таблица К.2 — Среднемесячные значения солености за январь (0.1)	145
Таблица К.3 — Среднемесячные значения солености за февраль (0.57)	146
Таблица К.4 — Среднемесячные значения солености за февраль (0.1)	147
Таблица К.5 — Среднемесячные значения солености за март (0.57)	148
Таблица К.6 — Среднемесячные значения солености за март (0.1)	149
Таблица К.7 — Среднемесячные значения солености за июль (0.57)	150
Таблица К.8 — Среднемесячные значения солености за август (0.57)	151
Таблица К.9 — Среднемесячные значения солености за сентябрь (0.57)	152
Приложение Л — Расчет вероятностных характеристик внутригодовой изменчивости речного стока для каждого месяца года	153
Таблица Л.1 — Оценка математического ожидания $m(t)$ и дисперсии $D(t)$	153
Приложение М	155
Таблица М.1 — Ординаты автокорреляционной функции среднемесячных значений солености воды	155

ВВЕДЕНИЕ

Устьевая область реки Северная Двина, включающая в себя низовье реки и вершину Двинского залива, представляет собой единый природный комплекс, сформированный взаимодействием реки и моря. Устье реки служит важнейшим узлом пересечения морских и речных путей на севере страны.

Первые исследования устья Северной Двины относятся к середине 16 века, когда началась внешняя торговля через Белое море.

Расположенный в вершине дельты Северной Двины старинный русский город Архангельск был основан как морской порт, через который начались первые торговые связи за границей. Географическое положение устья Северной Двины обусловило особую его роль в развитии исследований Арктики и освоении Северного Морского пути. А благодаря значительным природным ресурсам бассейна реки и моря, устьевая область Северной Двины играет важную роль в экономике района и страны в целом.

Гидрологический режим устьевой области как переходной между рекой и морем зоны формируется под влиянием речных факторов, отражающих воздействия бассейна реки, и морских факторов, отражающих воздействия моря. Таким образом, гидрологический режим устьевой области понимается как закономерная смена состояний взаимодействия реки и моря в пределах границ устьевой области. Существенное влияние на гидрологический режим оказывает геоморфология и климат устьевой области и непериодические сгонно-нагонные колебания, вызванные действием ветра. Сильные северо-западные и северные ветры, дующие не только в устье, но и во всем Белом море, вызывают нагонные подъемы уровня.

В устьевой области реки отмечаются наибольшие пространственно-временные изменения всех гидрологических и гидрохимических характеристик. Одной из таких характеристик является соленость, которая сравнительно мало подвержена влиянию антропогенных факторов и может служить индикатором естественных изменений в устьевой области реки.

В условиях существенного влияния речного стока на соленость вод устьевой области реки Северная Двина возникает необходимость в получении его количественных оценок и установления вида взаимосвязи.

Поэтому *целью* настоящей работы заключается в оценке влияния стока реки Северная Двина на соленость вод устьевой области.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Собрать необходимую информацию в различных источниках и подготовить временные ряды расходов и значений солености воды;
2. Выполнить анализ многолетней изменчивости стока реки и солености;
3. Провести анализ внутригодовой изменчивости стока и солености;
4. Обобщить результаты анализа и установить особенности влияния речного стока на режим солености вод устьевой части реки Северная Двина

Для решения поставленных задач в работе использовались данные наблюдений над расходами воды реки Северная Двина по постам Абрамково, Звоз, с. Усть-Пинега за период с 1976 по 2005 год и соленостью воды по морским станциям о. Мудьюги г. Северодвинск с 1976 по 2005 год, Зимнегорский маяк – с 1985 по 2005 год. Также измеренные значения за соленостью морских вод, выполненные во время сезонных съемок в

навигационный период сотрудниками Северодвинской устьевой станции на разрезах пр. Маймаксас 1990 по 2012 год.

Речной сток, поступающий в устьевую область реки Северная Двина, является основным определяющим фактором ее гидрологического режима.

Речной сток рассматривается как вероятностный полициклический процесс с основными энергонесущими зонами в диапазонах частот, соответствующих многолетним ($T > 1$ года) и внутригодовым ($T < 1$ года) колебаниями. Для анализа многолетней изменчивости привлекались ряды среднегодовых расходов и значений солености, которые рассматривались как стационарно случайные процессы и ежегодные последовательности значений для всех месяцев года, которые рассматривались как стационарные и стационарносвязанные случайные процессы, а также ряды измеренных значений солености по разрезам. Для установления особенностей внутригодовых колебаний использовались ряды среднемесячных расходов и солености, которые интерпретировались как периодически коррелированные случайные процессы. Привлечение для оценки многолетней и внутригодовой изменчивости стока и значений солености методов математической статистики (квантильного анализа данных, метод периодически коррелированных случайных процессов, корреляционного анализа, регрессионного анализа и низкочастотной фильтрации Баттерворта) значительно повышает достоверность полученных результатов.

1 Общая характеристика устьевой области реки Северная Двина

1.1 Краткая характеристика бассейна реки Северная Двина

Река Северная Двина крупнейшая река Европейского Севера России образуется от слияния рек Сухоны и Юга. Принадлежит бассейну Северного Ледовитого океана.

Длина реки от места слияния до впадения в Двинский залив Белого моря 750 км. Если же считать длину реки от истока реки Сухона, она будет равна 1312 км, а от истока наиболее длинного правого притока, реки Вычегда – 1810 км. Бассейн реки расположен между 58.5 и 65° северной широты и 38.5 и 56.5° восточной долготы. Площадь бассейна 357000 км². По величине бассейна река Северная Двина занимает пятое место среди рек Европейской части России. Бассейн представляет собой обширную лесистую, слабо всхолмленную равнину, приподнятую по краям и понижающуюся в северо-западном направлении. Вся поверхность бассейна покрыта мощным слоем ледниковых отложений, подстилаемых песчаниками, мергелями и известняками. Залесенность территории бассейна от 80 до 85%. Значительная площадь бассейна (около 8.5%) заболочена. Много моховых болот. Вечная мерзлота отсутствует [1].

Сток реки Северная Двина (110 км³ в год) составляет около трети общего речного стока в Баренцево и Белое моря.

Территория бассейна Северной Двины расположена в подзоне тайги с преобладанием хвойных (еловых и сосновых) лесов с примесью мелколиственных пород. Значительные пространства в долине реки занимают луга с пойменной разнотравно-крупнозлаковой растительностью. Леса по берегам Северной Двины богаты белыми грибами и ягодами: черника, голубика, клюква, брусника, красная и черная смородина (в пойме реки).

Берега Северной Двины преимущественно песчаные, внешне напоминают берега Волги. У истока Северная Двина имеет много песчаных мелей, которые ежегодно переменяют свое место; так, в верхней части реки на расстоянии 25 км насчитывают более 20 отмелей. Северная Двина уже от своего истока судоходна; протекая лесами и болотами, она скоро принимает значительные размеры и под Красноборском является широкой, полноводной рекой; далее, приняв значительные притоки Вагу, Емцу, Сию, Пинегу и некоторые другие, река быстро расширяется, размывая на пути своем рыхлые берега. Затем, встречая плотную почву, раздробляется на множество рукавов и так течет в море.

Гидрографическая сеть бассейна хорошо развита озерной сетью. Местами встречаются озера с небольшой площадью зеркала, расположенные, как правило, на водораздельных болотах или принадлежащих к конкретным бассейнам. Еще реже встречаются озера на старопойменных массивах. На территории более широко развита сеть озер-стариц на поймах рек, по реке Северная Двина на участке между впадением реки Юг и реки Вычегда.

Количество всех озер на водосборе равно 17602, общая их площадь – 1517 км².

Насчитывается 61879 рек и ручьев общей длиной 206248 км. Главные притоки: Сухона, Юг, Вычегда, Вага, Пинега.

Северная Двина – типичная равнинная река с плавным продольным профилем, сравнительно небольшими уклонами (средний уклон около 0.07‰) и широкой долиной, пойма которой достигает 10 км и более. В весенний период пойма реки затопляется. Извилистое русло реки изобилует островами, осередками и песчаными перекатами, затрудняющими судоходство.

Кроме множества частых островов, на Двине ежегодно образуются новые, которые потом размываются и заменяются другими. Большая часть из этих островов имеет вид открытых песчаных мелей и только иногда

занимаемых полями. Кроме передвижных мелей, есть и постоянные, которые хотя и углубляются иногда стремлением воды, однако, потом опять пополняются новым наносом песков. Течение Двины не быстрое. Фарватер идет большею частью посередине реки.

Река Северная Двина протекает в умеренном климатическом поясе, для которого характерны холодная зима и умеренно теплое лето. Климатические условия бассейна, определяющие гидрологический режим реки, характеризуются продолжительной и холодной зимой, коротким и прохладным летом и большим количеством осадков. За год в бассейне выпадает в среднем около 500 мм осадков, причем от 60 до 70% их приходится на теплую половину года. Бассейн реки Северная Двина, находящийся под влиянием влажных воздушных масс, поступающих с запада, относится к зоне избыточного увлажнения.

Гидрологический режим реки Северная Двина характеризуется высоким весенним половодьем, сравнительно низкой летней меженью с дождевыми паводками и низкими уровнями зимой. Реки района основное питание получают за счет таяния накопленных за зиму запасов снега.

Благодаря накоплению в течение длительной зимы осадков в виде снега и интенсивному весеннему таянию, объем стока весеннего половодья достигает 50% годовой величины стока воды, на лето приходится от 10 до 20%, на осень примерно 20%, на зиму от 5 до 10%. В маловодные годы доля весеннего стока может снижаться от 30 до 40%, а в многоводные увеличиваться от 60 до 80%.

Максимальный расход наблюдается в мае и июне до 20300 м³/с (рисунок 1.1.1). Замерзает в конце октября — начале ноября, вскрывается от начала апреля до начала мая. Ледоход бурный с частыми заторами.

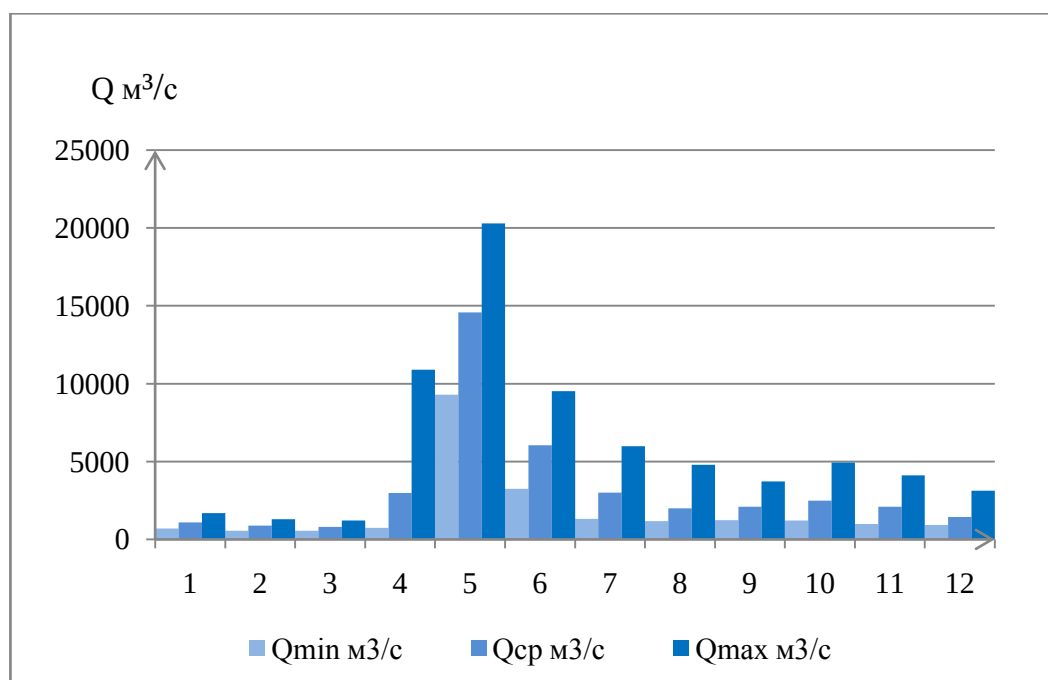


Рисунок 1.1.1— расход воды реки Северная Двина по месяцам за период с 1976 по 2005гг. в районес.Усть-Пинега.

В формировании гидрологического режима реки Северная Двина существенную роль играет направление течения реки с юга на север. Это особенно проявляется ввесенний и осенний периоды, то есть при вскрытии и замерзании рек.

1.2 Краткая характеристика Белого моря

Белое море представляет собой сравнительно небольшой, почти замкнутый неглубокий водоем, расчлененный на ряд вдающихся в сушу заливов. Почти со всех сторон окруженное сушей Белое море относится к внутренним морям. Основные черты режима Белого моря определяются его географическим положением, размерами, глубиной и рельефом дна, материковым стоком и водообменом с Баренцевым морем (рисунок 1.2.1).

Климатические условия Белого моря, расположенного между 64 и 68° северной широты, довольно суровы и вследствие глубокой врезанности моря в материк приобретают в некоторой мере континентальный характер. Одним из этих климатических условий является повышенная ледовитость Белого моря. Географическим положением объясняется отчетливо выраженный муссонный тип смены преобладающих ветров (юго-западных зимой и северных весной и летом) [1].

Площадь Белого моря с заливами 89607 км². Вся акваторию его, вследствие ее сложных очертаний и морфологических различий обычно разделяют на три основные части: Бассейн, Горло, Воронка. Кроме того, имеются глубоко вдающиеся в материк Мезенский, Двинский, Онежский и Кандалакшский заливы.

Наибольшие глубины достигают 350 м.

Пресные воды, поступающие в Белое море, повышают уровень воды в нем, вследствие этого избыток воды стекает через Горло в Баренцево море, чему способствует преобладание зимой юго-западных ветров. Вследствие разности плотностей вод Белого и Баренцева морей возникает течение из Баренцева моря. Происходит обмен водами между этими морями. Правда, котловина Белого моря отделена от Баренцева подводным порогом, расположенным на выходе из Горла. Наибольшие глубины его 40м, что затрудняет обмен глубинными водами между этими морями. Вследствие этого глубинные воды Белого моря обособлены и резко отличаются от смежных вод Баренцева моря. Влияние Баренцева моря затрудняется также из-за большой протяженности Горла и Воронки.



Рисунок 1.2.1— Рельеф дна Белого моря

В Белое море впадает значительное число больших и малых рек, в том числе Северная Двина, Мезень и Онега. Общая площадь бассейнов рек, впадающих в Белое море, составляет 726861 км², а суммарный сток этих рек за год в среднем равен 230 км³, изменяясь от 150 км³ в маловодный год и до 300 км³ в многоводный. Речной сток отличается большой неравномерностью. Наибольшая часть стока (около 45%) поступает в течение мая и июня, а за пять зимних месяцев (с декабря по апрель) поступает всего 15%. Из всех рек бассейна наибольшую долю стока дает река Северная Двина (48%), затем Мезень (11%) и Онега(8%) [1].

Влияние речного стока проявляется в сильном опреснении поверхностных вод моря, что обуславливает небольшую мощность деятельного слоя и служит одной из причин повышенной ледовитости.

В водном балансе Белого моря существенную роль играет водообмен с Баренцевым морем, составляющий 90% всего прихода и 99% всего расхода вод

моря. Водообмен между Белым и Баренцевым морями приводит к ежегодному возобновлению почти $2/3$ вод моря водами баренцевоморского происхождения, что способствует поддержанию значительной солености вод Белого моря и их солевого состава и повышению температуры воды. В тепловом балансе Белого моря принос тепла баренцевоморскими водами составляет от 15 до 20%.

В гидрологическом режиме Белого моря важное значение имеют приливные явления, вызывающие значительные колебания уровня воды во всех частях моря и мощные переменные течения в Воронке и Горле. Последние вызывают интенсивное турбулентное перемешивание, в результате чего здесь происходит смешение баренцевоморских вод с распресненными беломорскими водами.

Приливы в Белом море носят в основном полусуточный характер. Наибольшие приливы наблюдаются в Мезенском заливе, где средняя величина сизигийного прилива достигает 8м, наименьшие – в Бассейне и Двинском заливе (менее 1 м).

Уровень Белого моря подвержен также значительным непериодическим изменениям под влиянием метеорологических факторов и стока рек. Резкие колебания наблюдаются в результате сгонов и нагонов под действием ветров.

По характеру ледового режима Белое море относится к морям с сезонным ледяным покровом. Лед здесь бывает ежегодно с осени и до весны. Вдоль берега и в вершинах заливов образуется неподвижный лед, а на остальной акватории моря бывает плавучий лед, который частично выносится из Белого моря.

1.3 Рельеф и почвы

Устьевая область реки Северная Двина охватывает обширный участок нижнего течения реки от впадения реки Пинега до морского края дельты и юго-восточную часть Двинского залива Белого моря. Верхняя граница устьевой области проходит у устья реки Пинега, где прекращаются приливные колебания уровня. Морская граница проходит по свалу глубин, примерно по восьмиметровой изобате.

Устьевая область находится под постоянным воздействием реки и моря. Сложный гидрологический режим этой области складывается в результате взаимодействия речных и морских вод. Под воздействием вод реки и моря происходит формирование и развитие рельефа и гидрологической сети устьевой области. В устьевой области сохраняются черты, присущие реке и морю в целом.

Устьевая область реки Северная Двина (рисунок 1.3.1) делится на три части.

Приустьевой участок (от устья реки Пинега до города Архангельска). Имеет протяженность 95 км и характеризуется наличием хорошо разработанной четко оконтуренной крутыми нетерассированными склонами речной долины, сформировавшейся в послеледниковое время, а также широкой и сложно устроенной поймы и сильно разветвленного русла, образующего крупные группы островов.

Долина слабоизвилиста, ящикообразна, преимущественно с широким и хорошо выровненным пойменным дном. Наибольшая ширина долины 15 км. Склоны долины на протяжении всего приустьевого участка лишены террас; они почти прямые или слегка вогнутые, крутые или умеренно крутые, сильно рассеченные промоинами, оврагами, балками и долинами мелких притоков.

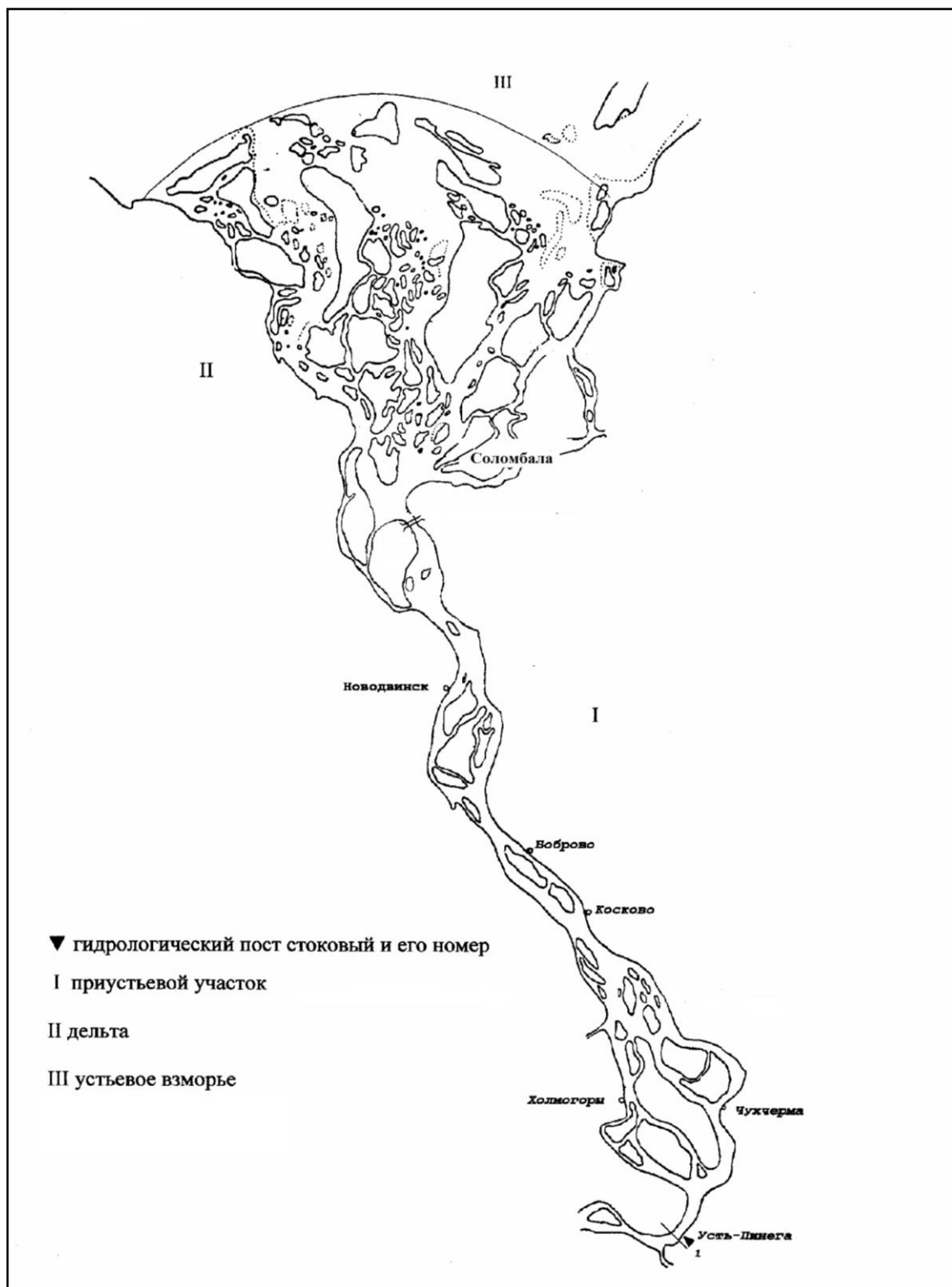


Рисунок 1.3.1— Устьевая область р. Северная Двина

Высота их от 30 до 40 м, местами до 45 и 50 м; в пределах впадины, в которой сформировалось Холмогорское расширение долины, а также кое-где

выше нее и в конце участка (только на правобережье) высота склонов преимущественно от 15 до 25 м, около города Архангельск – до 10м.

Склоны долины на приустьевом участке преимущественно открыты; местами на них сохранились перелески с древесными породами, теми же, что и за пределами долины (ель, береза, сосна и осина). Лес на подмываемых рекой склонах мало способствует их укреплению, свидетельством чего является тот факт, что оползни в одинаковой мере развиты и на залесенных и на открытых участках склонов.

Пойма преимущественно левобережная. Кроме присклоновой, широкое развитие получила островная пойма (около 40% общей площади поймы).

Последняя представлена несколькими группами мелких и крупных островов в Холмогорском расширении.

Ширина пойменной полосы колеблется от 3 до 5 км, в Холмогорском расширении долины она местами достигает от 8 до 10 км.

Затопление поймы приустьевого участка реки отмечается почти ежегодно, исключая годы с наиболее низким весенним половодьем. При средней высоте весеннего половодья пойма затопляется полностью, а глубина затопления достигает от 1 до 3м при уровнях, близких к многолетнему максимуму, глубина затопления увеличивается еще на 1 – 2 м. В годы с низким половодьем затоплению подвергаются только наиболее пониженные участки поймы.

Русло на приустьевом участке сильно разветвленное, на протяжении более 2/3 длины участка многорукавное. Одним руслом река течет в самом начале и в конце участка и еще в четырех местах между группами островов, в каждом случае на протяжении всего от 4 до 7 км. Количество крупных рукавов невелико: всего 2 – 3, при этом главный из них выделить не всегда удастся, так как наиболее крупные второстепенные рукава мало уступают главному рукаву по водности. При рассмотрении русла в качестве главного принят рукав,

используемый для транзитного судоходства. Он наиболее широк и глубоководен в период летнее-осенней межени.

Главное русло слабоизвилистое; плавные повороты имеют радиус от 2 до 4 км. Общая протяженность главного русла по фарватеру в пределах приустьевого участка 95 км. Ширина главного русла изменчива и увеличивается вниз по течению; преобладающая ширина на первых сорока километрах от 500 до 800 м, а ниже от 600 до 1200 м. Наибольшая ширина русла в конце участка до 2.3 и 2.5 км.

Главное русло преимущественно глубокое. Исключение составляет двадцатикилометровый перекатный участок, глубина по фарватеру не менее 5 м, преобладает глубина от 10 до 15 м. К концу участка глубина несколько возрастает. В отдельных ямах на 62, 54 и 42 км от устья глубины достигают от 20 до 30 м.

Русло реки изобилует песчаными перекатами, затрудняющими судоходство. Осередки и отмели встречаются редко. На всем протяжении русло чистое, не заросшее. Дно ровное, песчаное, местами песчано-гравелистое. Правый берег реки преимущественно незатопляемый и представляет собой коренной склон долины, у подножия имеющий каменистый бечевник. Левый берег – пойменный на большем его протяжении.

Дельта с тремя основными рукавами и многочисленными протоками. Длина дельты (по линии город Архангельск – остров Кумбыш) 37 км, ширина вдоль морского края дельты 45 км. Площадь дельты 895 км², 54% которой приходится на острова.

Дельта реки Северная Двина начинается у города Архангельска и напоминает полураскрытый веер. Слева она ограничивается Никольским рукавом и примыкающей к нему системой мелких протоков, справа – верхней частью Корабельного рукава, а затем протоком Кузнечиха, низовой частью протоки Маймакса и Корбельным устьем. Морской край дельты проходит по цепи низменных островов Ягры, Гремыха, Кумбыш, Голец, Лебедин, точнее, по

линии кошек, обсохших песчаных кос и мелей у этих островов (кошки Яндома, Сельдяная, остров Разбойник).

Острова дельты имеют разнообразные размеры и очертания. Они различны по происхождению и находятся на разных стадиях формирования.

Совокупность всех дельтовых островов представляют собой плоскую низменную равнину, расчлененную сложной гидрографической сетью дельты и образованную в основном вследствие аккумулятивной деятельности моря и реки в условиях регрессии моря, продолжающейся уже 5 тысяч лет.

Острова в пределах описываемого района песчаные и илисто-песчаные. Они не заболочены, преимущественно луговые, с кустарниковыми зарослями, вытянутыми полосами вдоль прирусловых валов. Весной острова обычно, хотя не ежегодно, затопляются водами реки. Острова, расположенные около северной границы района, затопляются и осенью при сильных ветровых нагонах.

Устьевое взморье, представляющее собой мелководную часть Двинского залива, с площадью в принятых границах (по восьмиметровой изобате) 260 км². В пределах устьевого взморья выделяется мелководная лагуна Сухое море, отделенная от Двинского залива островом Мудьюг и узкой Никольской косой.

Устьевое взморье реки Северная Двина представляет собой мелководную часть Двинского залива Белого моря, сложенную речными наносами, в которой наиболее ярко проявляются процессы взаимодействия речных и морских вод. С морфолого-генетической точки зрения взморье реки Северная Двина ближе подходит к типу приглубого с развивающейся подводной дельтой и свалом глубин.

Морская граница взморья, за которую принят свал глубин, представляет собой дугу, выпуклую в сторону дельты, концы которой находятся у устья реки Солза (в западной части) и поселком Куя (в восточной части). С юга (со стороны дельты) границей взморья является морской край дельты. В указанных границах площадь устьевого взморья 260 км².

По характеру рельефа дна, глубинам и другим геоморфологическим признакам устьевое взморье реки Северная Двина можно разделить на следующие зоны: 1) бар, 2) от бара до свала глубин, 3) свал глубин.

Первая зона занимает около 60% площади взморья. Основными формами рельефа ее являются придельтовые острова, подводные косы, бороздины, ямы и другие. Придельтовые острова созданы работой моря из материалов выноса реки. Косы и острова вытянуты в направлении с северо-востока на юго-запад.

Вторая зона занимает около 30% площади устьевое взморье. Это относительно ровное отмелое пространство с небольшими уклонами дна.

Третья зона, свал глубин, располагается в основном между изобатами от 6 до 8 м.

К северу от Корабельного устья располагается губа Сухое море, это мелководная, наполовину осушенная лагуна, отделенная от Двинского залива островом Мудьюг и узкой Никольской косой. Двумя выступами (мыс Заячий на острове Мудьюг и дельта реки Мудьюга) губа Сухое море делится на две половины, каждая из которых сообщается с Двинским заливом.

1.4 Гидрография

Гидрографическая сеть дельты довольно сложна (рисунок 1.4.1). Основу ее составляют 3 рукава: Никольский, Мурманский и Корабельный.

Основные рукава расходятся от вершины дельты и впадают в море. Нижние их участки резко расширены и именуются «устьями».

Никольский рукав в море выходит Пудожемским устьем; Мурманский – двумя устьями: Мурманским и Поганым. Корабельный рукав, сливаясь с протоком Маймакса перед выходом в море, образует широкую и мелководную воронку Корабельного устья.

Однако рукав этот мелководен, особенно в нижней своей части, и мало пригоден для судоходства. Другие два рукава пропускают около четверти годового стока и отличаются лучшими судоходными качествами.

По нижнему и верхнему участкам Корабельного рукава проходит морской путь к Архангельскому порту (среднюю мелководную часть рукава он обходит протоком Маймакса).

Основные рукава дельты.

Никольский рукав – крайний левый (западный) из рукавов. По направлению это как бы прямое продолжение реки Северная Двина в ее нижнем участке.

С этим и связана его главная роль в стоке воды и наносов.

Начинается Никольский рукав у города Архангельска, по линии приверх острова Кего – устье протоки Заостровка; оканчивается рукав Пудожемским устьем по линии кошка Яндомы (у острова Ягры) – кошка Гремиха.

Длина Никольского рукава по фарватеру 40 км, по прямой линии между устьем и истоком – 36 км. Рукав слабо извилист, коэффициент 1.1. Повороты русла (всего четыре: 2 вправо и 2 влево) плавны, их радиус не менее 3 км. Никольский рукав насыщен русловыми образованиями – островами, песчаными кошками, подводными мелями и косами.

Ширина рукава от 1.5 до 2 км, ниже ответвления протока Черенкома увеличивается до 3 и 4 км, а в 10 км от устья и до 6 км. Непосредственно на внешнем крае дельты ширина рукава снова уменьшается до 2 км. Наиболее узкий участок рукава у поселка Цигломень (около 1 км). В местах разветвления рукава ширина отдельных частей его уменьшается до нескольких сот метров.

Глубины по фарватеру от 2 до 15 м. Более глубокие участки (с глубинами 5 м и более) чередуются со сравнительно короткими мелководьями. Выход из Никольского рукава в море преграждается расположенным на устьевом взморье мелководным баром.

Наиболее широким из рукавов является Никольский. По нему река Северная Двина сбрасывает в море более трети годового стока воды и немногим менее половины стока взвешенных наносов.

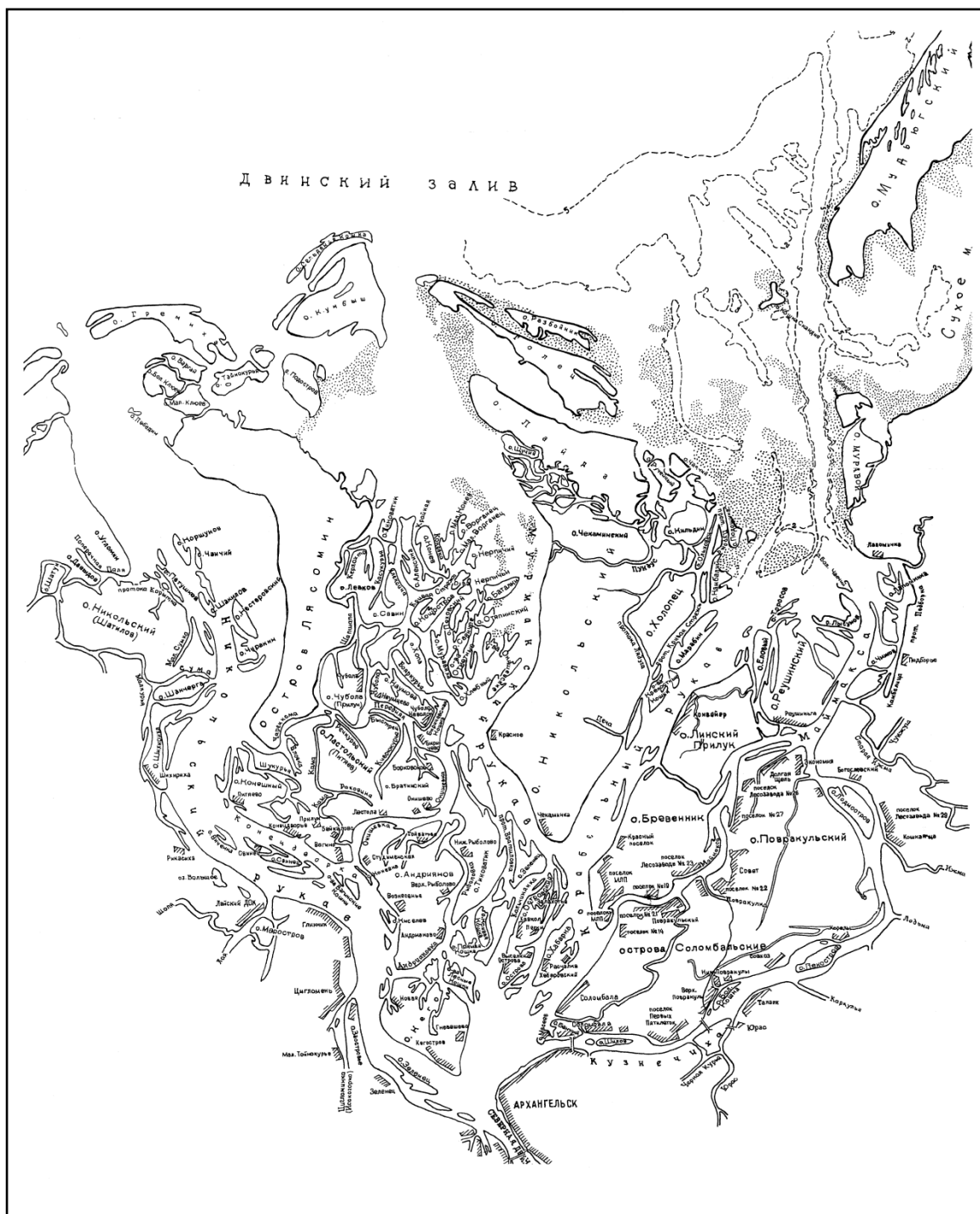


Рисунок 1.4.1— Схема гидрографической сети дельты р. Северная Двина

Мурманский рукав занимает осевое положение в дельте и делит ее площадь на две почти равные части. Начинается он ответвлением от Корабельного рукава у южной оконечности острова Никольский, в 10 км северо-западнее города Архангельска. Рукав ограничивается с обоих берегов тесными группами островов; с левого берега – преимущественно небольшими,

луговыми, затопляемыми весной при половодье и осенью при сильных ветровых нагонах, а с правого – крупнейшим из островов дельты – островом Никольским. В нижней части рукав расширяется, образуя так называемое Мурманское устье – мелководную воронку. К морю рукав выходит, огибая остров Кумбыш, двумя фарватерами – основным Мурманским и Поганым устьем. Длина Мурманского рукава 30 км, ширина от истока до поселка Красное от 0.5 до 1 км, ниже (до начала воронки) – от 1 до 2 км, в воронке – от 5 до 7 км. Ширина основного устья около 1.5 км (у западной оконечности острова Голец), Поганого устья – 0.6 км (у южной оконечности острова Кумбыш). Общее направление Мурманского рукава совпадает с направлением Никольского рукава. Это явление одно из особенностей морфологии дельты.

Корабельный рукав начинается у города Архангельска и на всем протяжении (35 км) следует прямо на север. По водности, морфометрическим особенностям и использованию рукав делится на три участка: верхний – до ответвления основного истока Мурманского рукава, средний – от основного истока Мурманского рукава до поселка Лапоминка, нижний – от поселка Лапоминка до внешнего края дельты, проходящего по линии остров Лебедин – остров Разбойник. Верхний участок (длина 11 км) обладает исключительно высокой водностью (около 60% общего стока реки). Однако с ответвлением каждого из протоков, а особенно Мурманского рукава, водность его резко снижается и в конце участка составляет всего треть начального своего значения. Заметно снижается и ширина рукава: у города Архангельск она от 2 до 3 км, ниже острова Молодежный от 0.8 до 1 км. Глубина основного судоходного фарватера составляет от 7 до 11 м. Средний участок Корабельного рукава во многом напоминает Никольский рукав: он широк, но мелководен, насыщен песчаными мелями, кошками и небольшими низменными островками. Участок почти прямолинеен, но фарватер из-за наличия мелей и кошек слабоизвилист. Глубина участка по фарватеру от 1.5 до 7.5 м, преимущественно от 4 до 6 м, ширина от 1.2 до 3 км, чаще около 2 км. Нижний участок

Корабельного рукава, длиной 6 км, представляет собой обширное мелководье, большая часть которого занята илисто-песчаными или песчаными мелями.

В дельте реки Северная Двина насчитывается свыше 150 протоков. Большинство из них имеет незначительную длину, узки, несудоходны и не имеют хозяйственного значения. Дадим характеристику лишь двум основным протокам дельты, обладающих значительной пропускной способностью для стока воды.

Проток Маймакса ответвляется от Корабельного рукава на 8 км от его истока, у приверха острова Бревенник, течет параллельно среднему участку Корабельного рукава и вновь присоединяется к нему уже в пределах его устьевого расширения, именуемого Корабельным устьем. Длина протока 23 км. У поселка Экономия (на 13 км от истока) Маймакса принимает крупнейший из протоков дельты – Кузнечиху. До принятия протока Кузнечиха проток Маймакса извилист и очень узок. Минимальный радиус закругления русла здесь 0.5 км, ширина русла от 200 до 300 м, местами до 180 м. Ниже впадения протока Кузнечиха преобладающая ширина возрастает в 2 раза (500 – 600 м), и русло выпрямляется. Русло протока Маймакса на всем протяжении глубокое, неразветвленное. Глубины на фарватере повсеместно свыше 7.6 и 8 м, а местами достигают от 10 до 13 м. Пропускная способность протока Маймакса в истоке от 8 до 16% расхода воды в вершине дельты. С принятием протока Кузнечиха водность протока Маймакса увеличивается в 1.2 – 1.5 раза. Проток Маймакса – важнейшее звено в системе водотранспортных путей Архангельского порта. По этому протоку проходит основной морской фарватер.

Проток Кузнечиха второй по величине и значимости проток дельты, пропускная способность которого в 2 – 3 раза меньше пропускной способности протока Маймакса и составляет от 3 до 4% (в межень) и от 7 до 8% (в половодье) от общей пропускной способности водотоков дельты. По ширине русла проток Кузнечиха не уступает протоку Маймакса, но отличается мелководностью. Проток окаймляет дельту справа и является ее восточной

границей. Начинается этот проток у города Архангельск ответвлением от Корабельного рукава; вначале следует в северо-восточном направлении, а после принятия реки Лодьма – в северо-западном направлении и впадает в проток Маймакса справа на 13 км от истока. Русло протока Кузнечиха умеренно извилистое, слабо разветвленное. Длина протока 25 км. Ширина русла от 300 до 500 м, местами уменьшается до 200 м. Наибольшая ширина около 800 м (4 км от истока). От истока до Пекострова проток Кузнечиха мелководен (глубина на фарватере от 1 до 3 м, редко достигает 6 м). На последних 4 км перед устьем проток наиболее глубоководен (от 7 до 9 м, местами до 16 м на фарватере).

2 Речной сток

Речной сток, поступающий в устьевую область реки Северная Двина, является основным определяющим фактором ее гидрологического режима.

Замыкающий гидроствор на входе в устьевую область расположен в 140 км от морского края дельты ус. Усть-Пинега, ниже впадения реки Пинега и замыкает площадь водосбора, равную 348000 км², что составляет 97.5% всей площади водосбора (357000 км²). Данные наблюдений над стоком на гидростворе Усть-Пинега достаточно полно характеризуют объем и режим стока, поступающего в устьевую область.

Преобладание снегового питания и сравнительно малая доля подземного питания обуславливают неравномерное распределение стока в году. Основная часть стока (примерно от 50 до 60%) поступает в весенний период (с апреля по июнь) вследствие таяния снега и весенних дождей (рисунок 2.1).

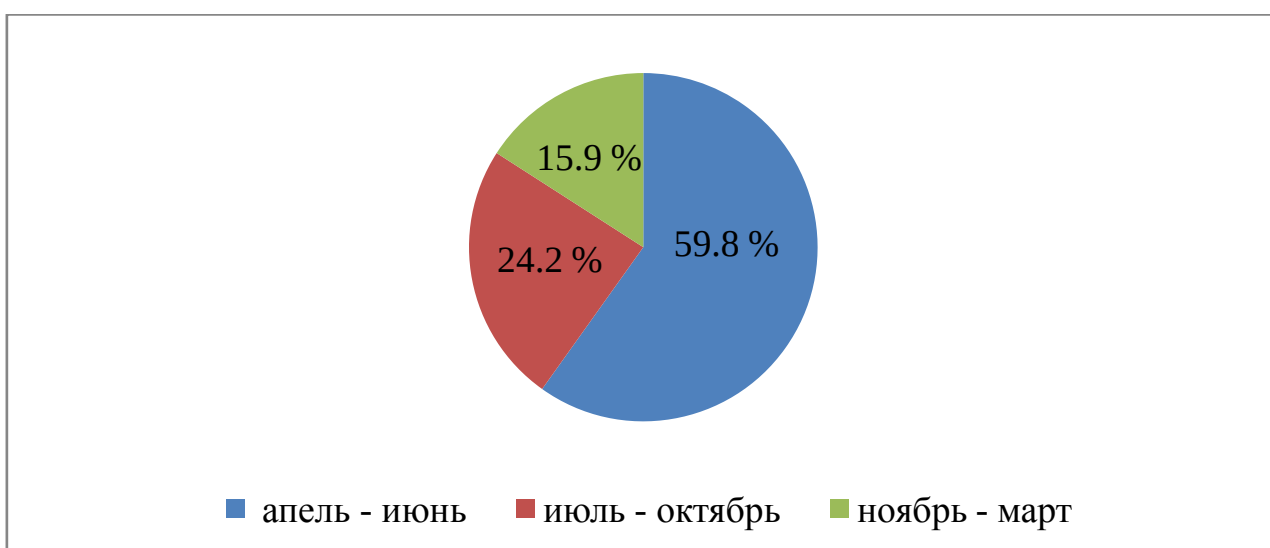


Рисунок 2.1 — Сезонное распределение среднего годового расхода воды по посту с. Усть-Пинега процентах за период с 1976 по 2005 гг

Зимой сток постепенно уменьшается от начала ледостава до весеннего подъема. Половодье сопровождается большими подъемами уровня воды. Амплитуда колебания уровня воды на р. Северная Двина достигает 10 – 12 м. Зимний минимум почти всегда является и годовым. В осенний период часто

проходят дождевые паводки, поэтому водность реки в этот период, как правило, больше, чем в летний и зимний периоды.

Средний годовой расход воды по этому гидроствору за рассматриваемый период с 1976 по 2005 гг составил 3290 м³/с (104 км³/год). Средний годовой модуль стока равен 9.45 л/с с 1 км², слой стока – 298 мм в год.

Распределение стока не остается постоянным, оно незначительно меняется в зависимости от водности года. Доля весеннего стока увеличивается в маловодные годы, когда летний сток понижен и уменьшается в многоводные годы, что связано с увеличением летнего и осеннего стока в результате прохождения более высоких дождевых паводков.

Внутригодовое распределение стока в различные по водности типы лет представлено в таблице А.1. Внутригодовое распределение стока на морском крае дельты принимается равным внутригодовому распределению стока по створу Усть-Пинега, выраженному в процентах.

Средние годовые величины расходов воды подвержены многолетним изменениям. За 30-летний период наблюдений средние годовые расходы изменялись от 2250 м³/с (80 км³/год 1996 г) до 4112 м³/с (130 км³/год 1993 г).

В многолетнем изменении объемов стока, являющемся полициклическим процессом, проявляются колебания стока с периодами около 5, 20 – 22 и 35 лет. Основной период колебаний – 5 лет. Именно с этим периодом происходят колебания годовых сумм осадков в бассейне реки, связанные с изменениями атмосферной циркуляции. Колебания с периодами 20 – 22 и 35 лет связаны с циклами солнечной активности.

В соответствии с цикличностью процессов стока происходит смена маловодных и многоводных лет. Многолетняя изменчивость стока анализируется по рядам среднегодовых и экстремальных расходов воды. Среднегодовые расходы используются для характеристики «нормы» и изменчивости годового стока. Экстремальные расходы используются для

характеристики минимального стока, максимального стока весеннего половодья и дождевых паводков.

2.1 Многолетние колебания речного стока

Межгодовую изменчивость стока можно рассматривать и анализировать по рядам среднегодовых и экстремальных расходов, что определяет наличие многоводных и маловодных лет. Экстремальные расходы также используют для характеристики максимального стока весеннего половодья и дождевых паводков. Среднегодовые расходы используют для характеристики «нормы» и изменчивости годового стока.

Для анализа многолетней изменчивости используем данные среднегодовых значений и средних многолетних значений расходов для каждого месяца приведенного периода.

Гидрологические ряды исходных данных прошли проверку на однородность. Для чего использовались два параметрических критерия – критерий Фишера и Стьюдента. Расчет числовых характеристик является корректным только в том случае, если в течение всего периода наблюдений условия формирования стока не изменялись. Критерий Фишера позволяет произвести проверку на однородность по дисперсии, а критерий Стьюдента – по среднему значению. Проверка на однородность рядов показала, что гипотеза об однородности ряда не опровергается как по критерию Фишера, так и по критерию Стьюдента (таблица 2.1.1).

Гидрологические посты:

Река	Местоположение (название)	Расстояние от устья,	Площадь водосбора, кв.км	Куда впадает
------	------------------------------	-------------------------	--------------------------------	-----------------

	поста	км		
р. Северная Двина	д. Абрамково	528	220000	Белое море
р. Северная Двина	д. Звоз	276	285000	Белое море
р. Северная Двина	с. Усть-Пинега	137	348000	Белое море

Таблица 2.1.1 — Оценка гидрологического ряда на однородность с помощью стандартных параметрических критериев Стьюдента и Фишера

Река - Пункт	t^*	$t(2\alpha)$	H_0	F^*	$F(2\alpha)$	H_0
р. Северная Двина – г.п. Абрамково	1.402	2.071	+	1.024	3.443	+
р. Северная Двина – г.п. Звоз	0.861	2.071	+	1.114	3.443	+
р. Северная Двина – г.п. Усть-Пинега	0.819	2.071	+	1.369	3.443	+

На рисунке 2.1.1 представлены реализации средних годовых расходов воды на реке Северная Двина.

Анализ реализаций показывает наличие многоводных и маловодных групп лет. Для их характеристики применим квантильный анализ данных с использованием средних годовых значений.

Для аппроксимации корреляционных зависимостей межгодовой изменчивости стока реки Северная Двина, рассчитанных для каждого месяца года, используем параметры процесса авторегрессии первого порядка. Ординаты автокорреляционной функции среднемесячных расходов воды за период (с 1976 по 2005 гг) приведены в приложении В.

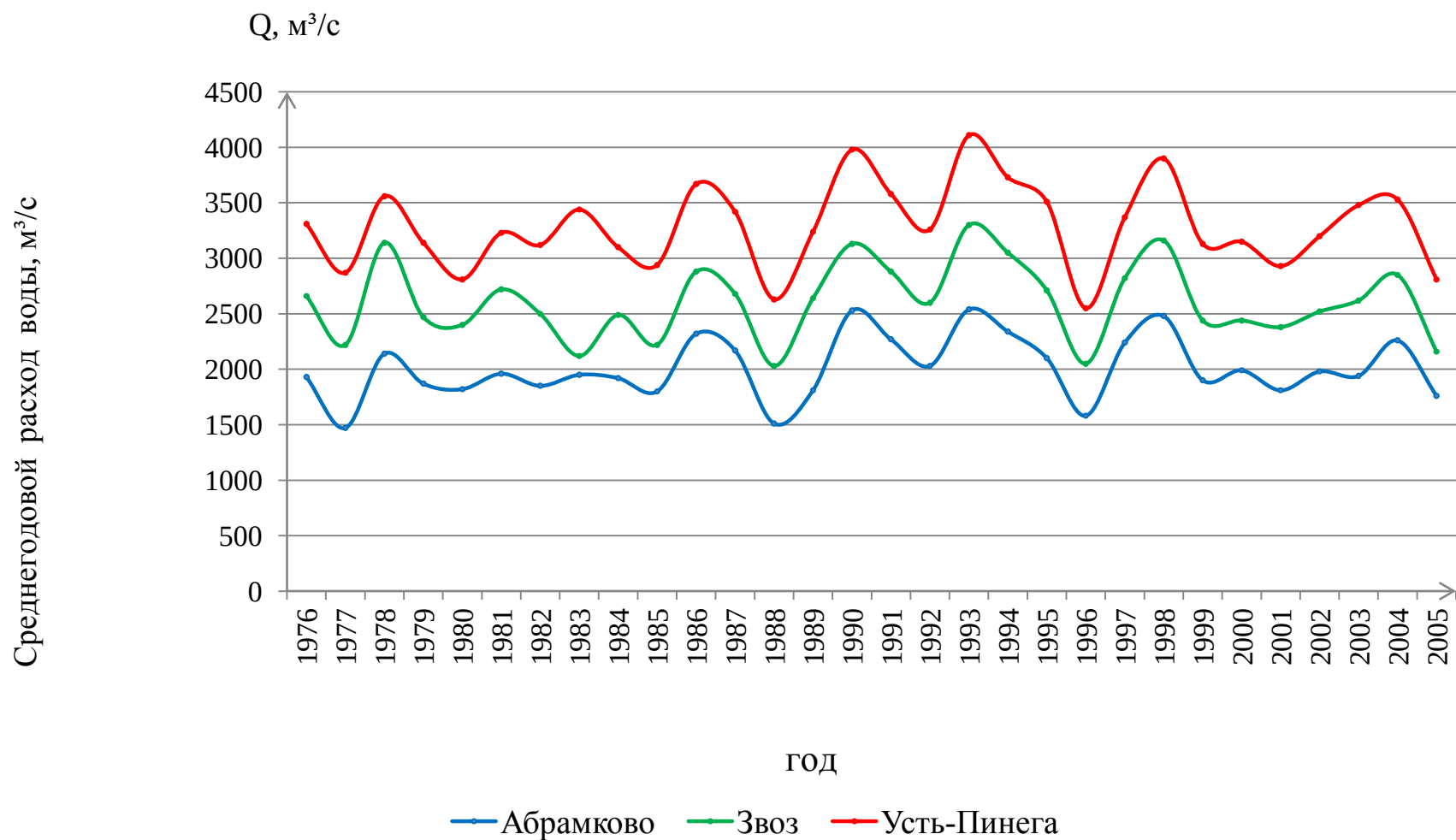


Рисунок 2.1.1 — Средние годовые расходы воды р. Северная Двина за период с 1976 по 2005 гг

Квантильный анализ

Каждый временной ряд рассматривается как реализация случайного процесса $x(t)$, за основную вероятностную характеристику которого принимается функция распределения $F(x)$ и ее квантили x_p .

Наибольший интерес представляют пять квантилей:

$$X_{\min}, X_{0.25}, X_{0.5}, X_{0.75}, X_{\max}.$$

Чтобы рассчитать квантили необходимо произвести ранжирование ряда по возрастанию. Любая порядковая статистика представляет собой функцию всей совокупности результатов данной выборки: чтобы найти нужную порядковую статистику, следует предварительно расположить по порядку все элементы выборки. $x_{\min}$ и $x_{\max}$ – крайние члены ранжированного ряда;

При нечетном объеме выборки $n = 2k-1$ порядковая статистика $x_{(k)}$ называется выборочной медианой. В случае четного объема выборки $n = 2k$ она определяется как полусумма двух центральных порядковых статистик, а именно:

$$X_{0.5} = \frac{x_k + x_{k+1}}{2} \quad (2.1.1)$$

$X_{0.25}, X_{0.75}$ – медианы соответствующих половин ранжированного ряда.

Крайние члены ряда $x_{\min}$ и $x_{\max}$ подвержены сильному влиянию выборочной изменчивости, обусловленной ошибками измерения исходных величин. Значительно большей устойчивостью обладает размах характеризующий ширину выборочного распределения данных:

$$R = x_{\max} - x_{\min}, \quad (2.1.2)$$

где $x_{\min}$ и $x_{\max}$ – крайние члены ранжированного (выстроенного в порядке возрастания) ряда.

Медиана $x_{0.5}$, являясь средним членом ранжированного ряда, характеризует центр распределения данных в выборке. Отклонение медианы $x_{0.5}$ от центра ящика свидетельствует о асимметричности распределения данных. Набор квантилей, $x_{0.25}$, $x_{0.5}$, $x_{0.75}$ фиксирует «норму» изменчивости анализируемого параметра. Величина Q называемая интерквантильным расстоянием, служит мерой разброса в пределах «нормы».

Значения анализируемого параметра, входящие за квантили $x_{0.25}$, $x_{0.75}$, можно рассматривать как особые значения, выходящие за верхний и нижний внутренние барьеры, вычисляемые по формулам:

$$x_{\text{в}} = x_{0.75} + 1.5Q, \quad (2.1.3)$$

где $x_{\text{в}}$ – расход верхнего барьера, $\text{м}^3/\text{с}$

$x_{0.75}$ – медиана половины ранжированного ряда;

Q – интерквантильное расстояние.

$$x_{\text{н}} = x_{0.25} - 1.5Q \quad (2.1.4)$$

где $x_{\text{н}}$ – расход нижнего барьера, $\text{м}^3/\text{с}$;

$x_{0.25}$ – медиана половины ранжированного ряда;

Q – интерквантильное расстояние.

В качестве оценки центра распределения данных в выборке можно рассматривать математическое ожидание m и трехсреднее значение T^* , а в качестве оценок масштаба распределения – дисперсию D или стандарт σ . Оценки математического ожидания и дисперсии обычно вычисляются как среднее арифметическое значение и квадрат отклонений от него, трехсреднее значение – по формуле Тьюки:

$$T_3 = (x_{0,25} + 2x_{0,5} + x_{0,75})/4. (2.1.5)$$

ГДЕ $x_{0,25}, x_{0,5}, x_{0,75}$ – КВАНТИЛИ.

Сопоставление среднего m с медианой $x_{0,5}$ и стандарта σ с интерквантильным расстоянием Q дает возможность получить предварительную информацию о типе и параметрах распределения данных в выборке. При симметричности распределения среднее и медиана равны с точностью до выборочной изменчивости. Чем асимметричнее распределения, тем больше отклоняется среднее от медианы.

Сопоставление оценок среднего и медианы, стандарта и интерквантильного расстояния удобно проводить графически. Для этого на график наносятся точки, абсциссы которых соответствуют среднему или стандарту, а ординаты – медиане или интерквантильному расстоянию. Если точки группируются около биссектрисы координатного угла, можно считать, что соотношения Q/σ и $x_{0,5}/m$ такое же, как у нормального распределения данных.

В качестве другой характеристики асимметрии полезно использовать следующий параметр:

$$A_s = [(x_{0,75} - x_{0,5}) - (x_{0,5} - x_{0,25})]/(2Q), \quad (2.1.6)$$

Расчеты доверительных интервалов A_s , вычисленные по смоделированным нормальным рядам показали, что выборку целесообразно считать симметричной, если $-0.31 < A_s < 0.25$, имеющей левую асимметрию, если $A_s < -0.31$ или правую при $A_s > 0.25$.

Квантильный анализ показал наличие многоводных и маловодных групп лет в стоке реки, которые наблюдались как разрозненно, так и группировались в фазы и циклы. Например для многоводных лет это 1990 – 1991 гг; 1993 – 1994 гг по всем постам. Для маловодных лет это 1984 – 1985 гг (по с. Усть-Пинега) и 1988 – 1989 гг (д. Абрамково). Синхронные многоводные годы на р. Северная Двина наблюдались: 1986, 1990, 1991, 1993, 1994, 1998 гг.; синхронные маловодные годы: 1977, 1988, 1996, 2005 гг. Экстремальных многоводных и маловодных лет за рассматриваемый период не наблюдалось. Результаты квантильного анализа многолетней изменчивости приведены в таблице 2.1.3 и рисунках 2.1.2 – 2.1.4.

Графики оценок корреляционных зависимостей межгодовой изменчивости $K(t, \tau)$, $\tau = 1$ год достаточно быстро затухают на начальном участке, продолжая флуктуировать около нулевого уровня только для некоторых месяцев года.

Таблица 2.1.1 — Сведения о многоводныхгодах на реке Северная Двиназа период с 1976 по 2005 гг

Многоводные годы		
р. Северная Двина – г.п. Усть-Пинега $Q > 3530$	р. Северная Двина – г.п. Абрамково $Q > 2240$	р. Северная Двина – г.п. Звоз $Q > 2850$
1978, 1986, 1990–1991, 1993–1994, 1998	1986, 1990–1991, 1993–1994, 1998, 2004	1978, 1986, 1990–1991, 1993–1994, 1998
Экстремально многоводные годы		
—	—	—

Таблица 2.1.2 — Сведения о маловодных годах реке Северная Двиназа период с 1976 по 2005 гг

Маловодные годы		
р. Северная Двина – г.п. Усть-Пинега $Q > 3100$	р. Северная Двина – г.п. Абрамково $Q > 1820$	р. Северная Двина – г.п. Звоз $Q > 2400$
1977, 1980, 1984–1985, 1988, 1996, 2001, 2005	1977, 1985, 1988–1989, 1996, 2001, 2005	1977, 1988, 1996, 2001, 2005
Экстремально маловодные годы		
—	—	—

Таблица 2.1.3 — Статистические характеристики межгодовой изменчивости

Название реки и пункта	Кол- во лет	$Q_{\min}$	$Q_{0.25}$	$Q_{0.5}$	$Q_{0.75}$	$Q_{\max}$	R	Q	$Q_{\text{в.}}$	$Q_{\text{н.}}$	T	A_s
р. Северная Двина— г.п. Усть- Пинега	30	2550	3100	3250	3530	4110	1560	430	4175	2455	3282.5	0.15
р. Северная Двина— г.п. Звоз	30	2030	2400	2610	2850	3300	1270	450	3525	1725	2617.5	0.03
р. Северная Двина— г.п. Абрамково	30	1470	1820	1960	2240	2540	1070	420	2870	1190	1995	0.17

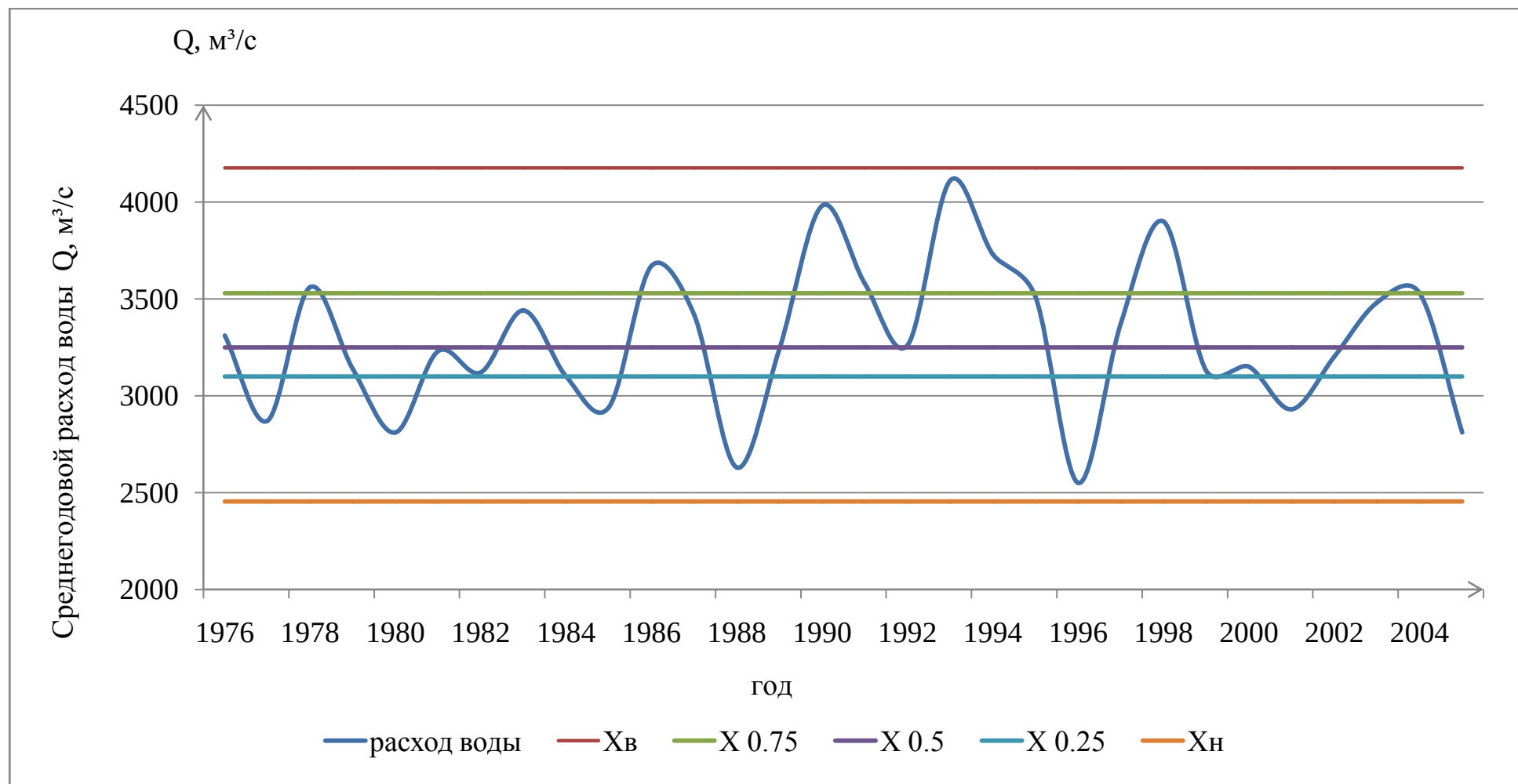


Рисунок 2.1.2— Квантильный анализ рядов среднегодовых расходов воды р. Северная Двина – г.п. Усть-Пинега

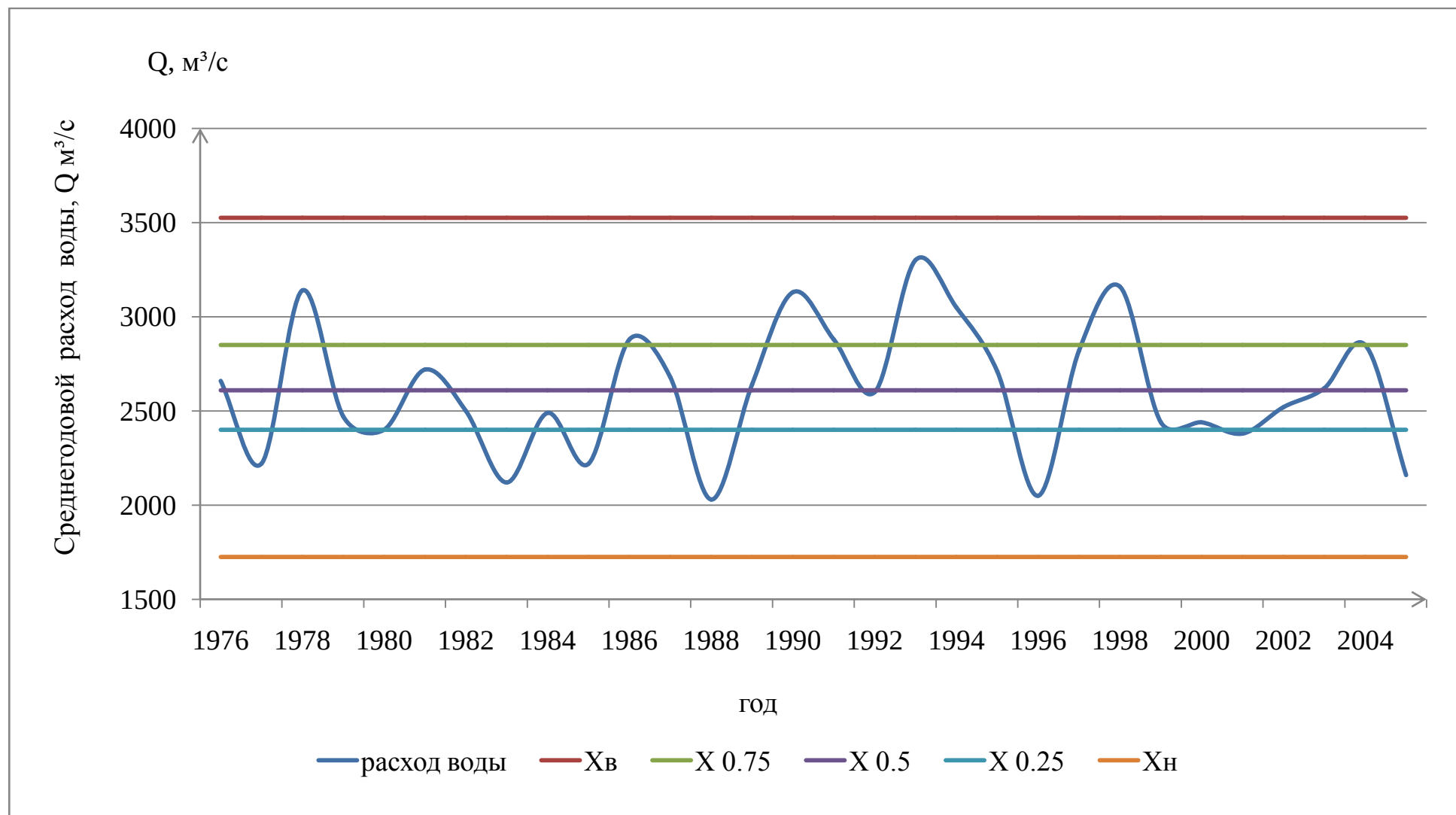


Рисунок 2.1.3— Квантильный анализ рядов среднегодовых расходов воды р. Северная Двина – г.п. Звоз

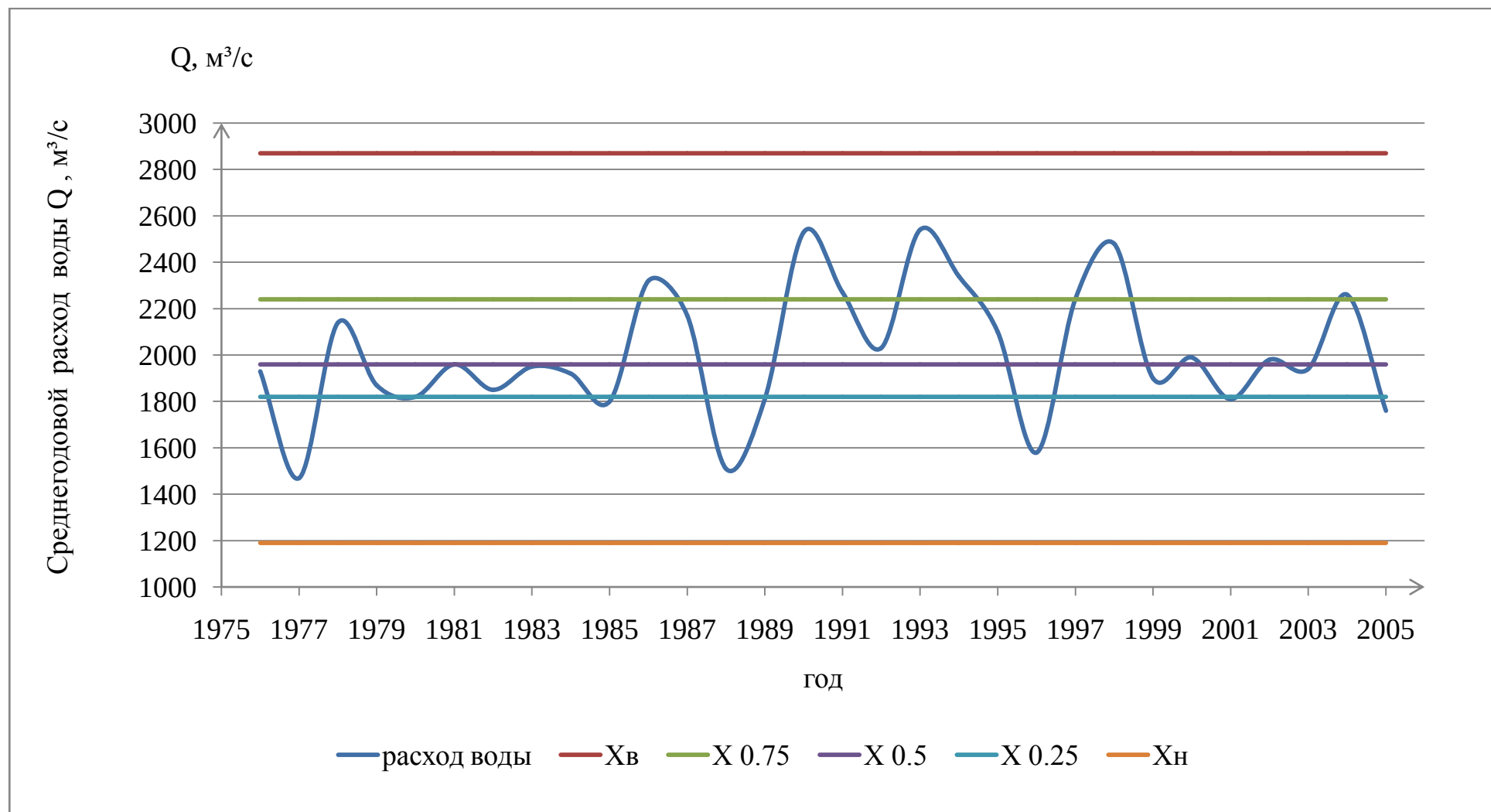


Рисунок 2.1.4— Квантильный анализ рядов среднегодовых расходов воды р. Северная Двина – г.п. Абрамково

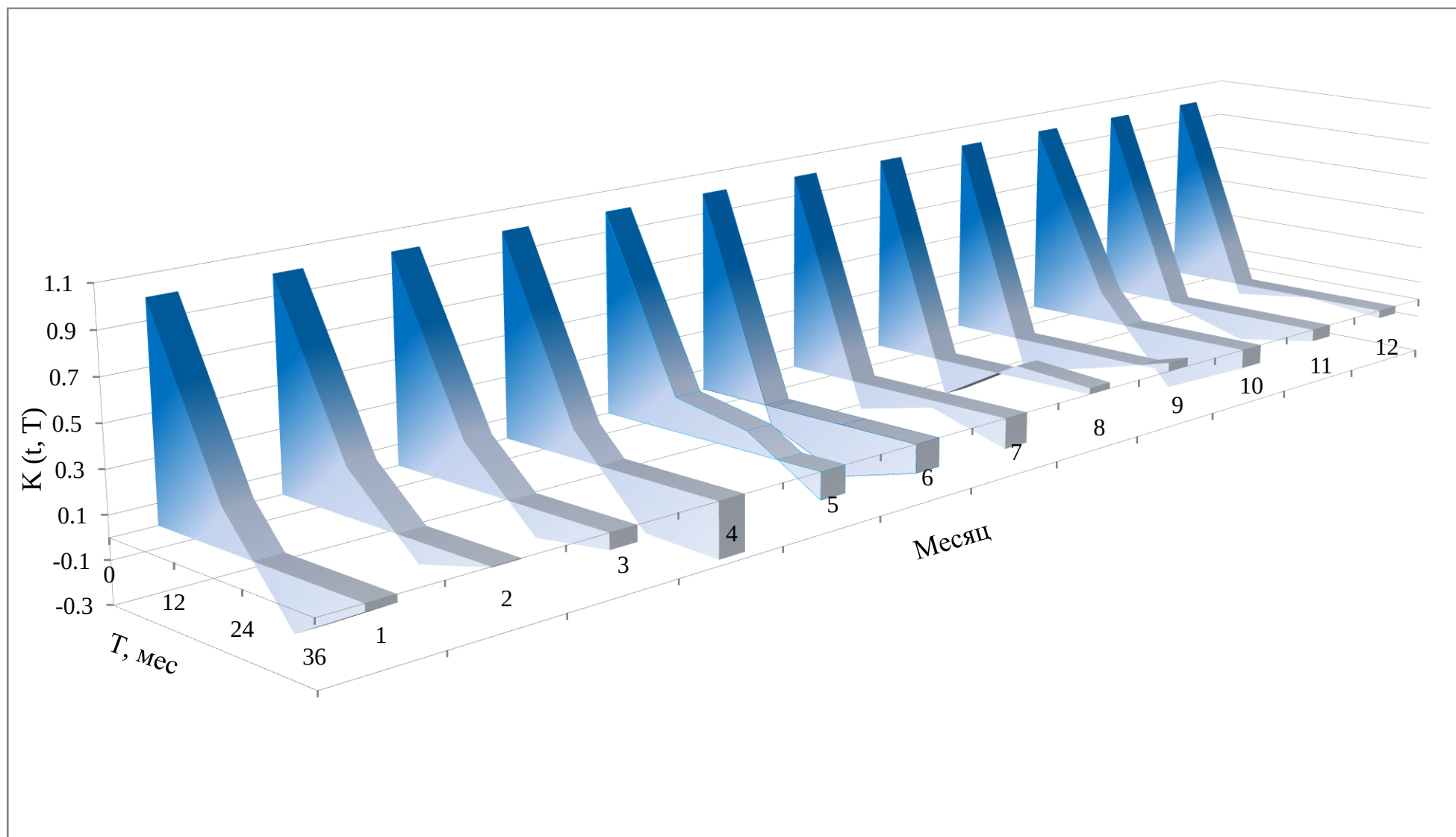


Рисунок 2.1.5— Графики оценок корреляционных функций ежегодных последовательностей расходов воды для всех месяцев г.р. Северная Двина – г.п Усть-Пинега

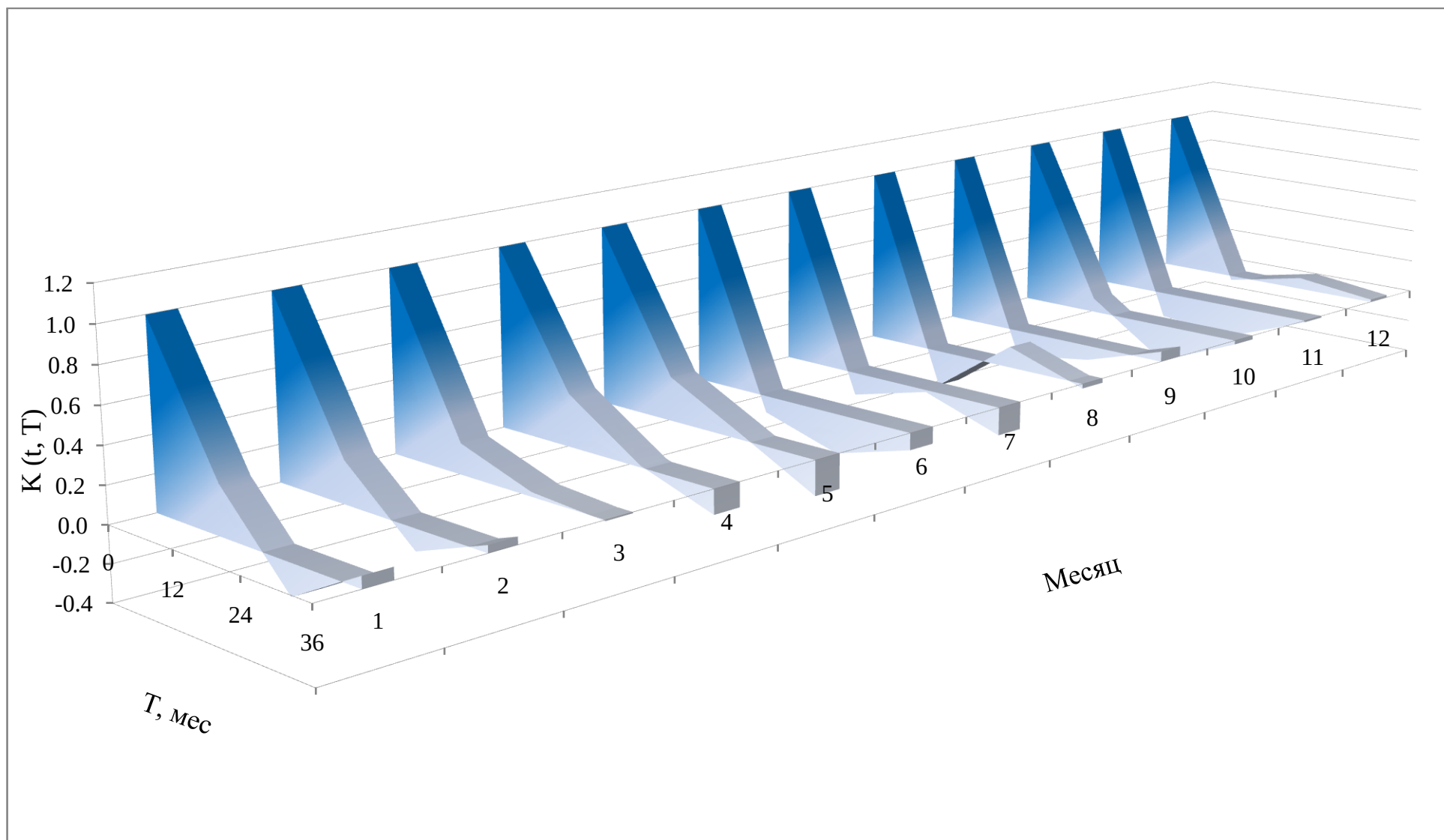


Рисунок 2.1.6— Графики оценок корреляционных функций ежегодных последовательностей расходов воды для всех месяцев р. Северная Двина – г.п Звоз

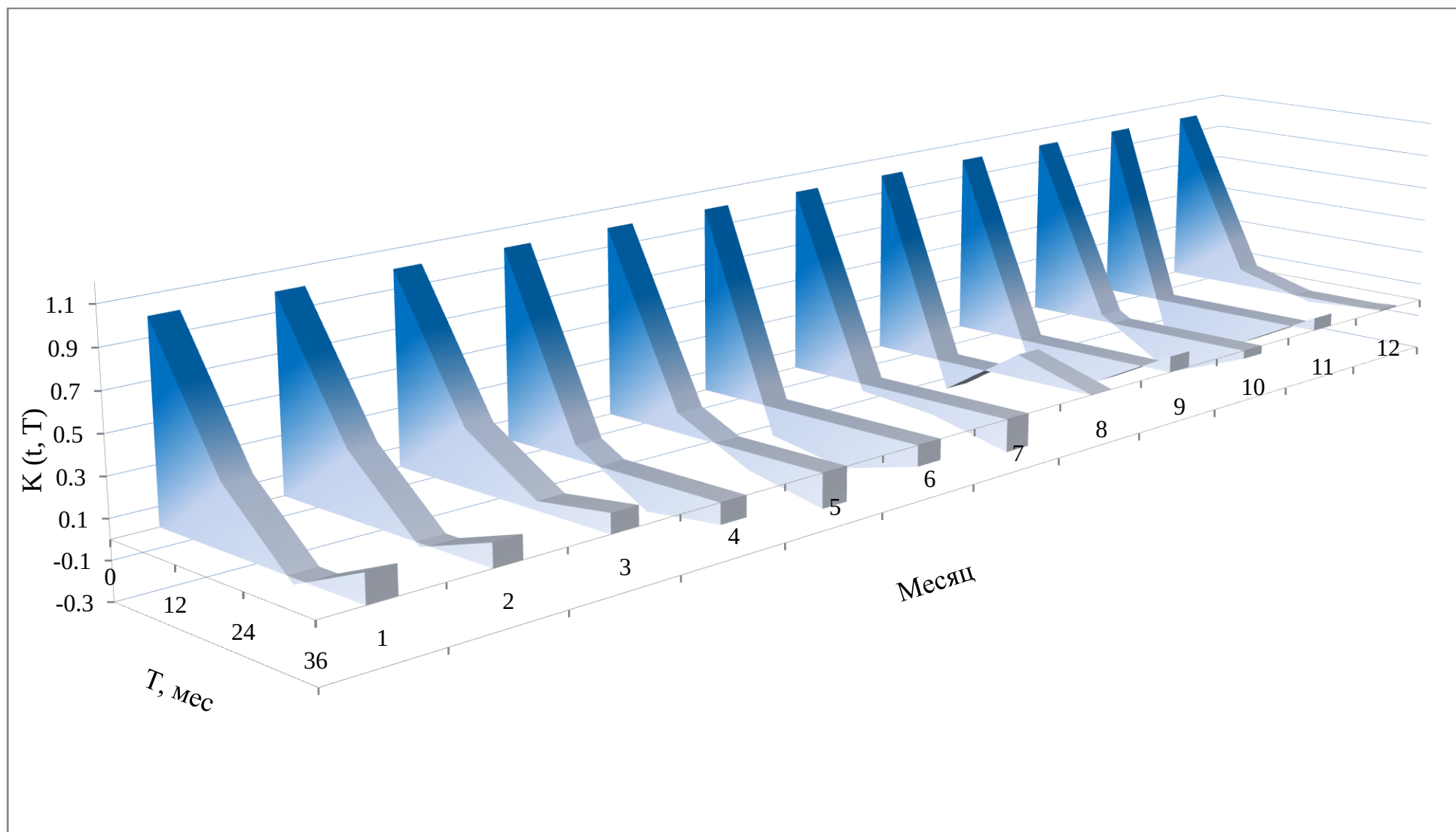


Рисунок 2.1.7— Графики оценок корреляционных функций ежегодных последовательностей расходов воды для всех месяцев года р. Северная Двина – г.п Абрамково

2.2 Внутригодовые колебания речного стока

Река Северная Двина по климатическим особенностям формирования стока относится к группе рек Восточно-Европейского типа режима по классификации Б.Д. Зайкова. Для рек этого типа характерны высокое весеннее половодье, ежегодно повторяющиеся летне-осенние паводки и очень низкая зимняя межень (рисунок 2.2.1). Величина стока весеннего половодья определяется величиной снегозапасов в бассейне, а также весенними дождевыми осадками.

Преобладание снегового питания и незначительная доля подземного питания определяет неравномерное распределение стока в году. В осенний период достаточно часто проходят дождевые паводки, поэтому водность в этот период зачастую больше, чем в летний и зимний периоды.

Расчет внутригодового распределения стока представляет собой количественную оценку распределения стока по сезонам года, а также по декадам и неделям внутри месяца. В качестве исходной информации для анализа внутригодового колебания речного стока, в настоящей работе использованы среднемесячные расходы воды по реке Северная Двина по постам – д. Абрамково, д. Звоз, с. Усть-Пинега. Для анализа внутригодовой изменчивости стока реки применим метод ПКСП (периодически коррелированный случайный процесс).

Метод ПКСП

Случайным процессом $X(t)$, называется процесс, значение которого при любом фиксированном $t = t_i$ является случайной величиной.

Реализацией случайного процесса $X(t)$ называется неслучайная функция $x(t)$, в которую превращается случайный процесс $X(t)$ в результате опыта.

Случайная величина $X(t_i)$, в которую обращается случайный процесс при $t = t_i$, называется сечением случайного процесса, соответствующим данному значению аргумента.

Математическим ожиданием СП $X(t)$ называется неслучайная функция $m_x(t)$, которая при любом значении аргумента равна математическому ожиданию соответствующего сечения СП:

$$m_x(t) = M[X(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_1(x, t) dx \quad (2.2.1)$$

где $f_1(x, t)$ – одномерная плотность распределения СП $X(t)$.

Дисперсией СП $X(t)$ называется неслучайная функция $D_x(t)$, которая при любом значении аргумента равна дисперсии соответствующего сечения СП $X(t)$:

$$D_x(t) = D[X(t)] = M\{[X(t) - m_x(t)]^2\} \quad (2.2.2)$$

В общем случае случайный процесс $\xi(t)$, $t \in (-\infty, \infty)$, называют периодически коррелированным, если существует такое фиксированное положительное число T , при сдвиге на которое, характеристики процесса остаются инвариантными. Математическое ожидание периодически коррелированного случайного процесса определяется как:

$$m_\xi(t) = M\{\xi(t+kT)\}, \quad (2.2.3)$$

а корреляционная функция – как:

$$K_\xi(t, \tau) = M\{\xi^\circ(t+kT) \xi^\circ(t+\tau+kT)\}, \quad (2.2.4)$$

где

$$\xi^{\circ}(t) = \xi(t) - m_{\xi}(t);$$

τ – сдвиг корреляционной функции.

При $\tau = 0$ функция (2.2.4) равна дисперсии процесса $D_{\xi}(t)$. Функции $m_{\xi}(t)$, $D_{\xi}(t)$, $K_{\xi}(t, \tau)$ являются периодическими по аргументу t с периодом T , который называется периодом коррелированности. Естественным периодом коррелированности речного стока и колебаний уровня служит период равный одному году. Характеристики ПКСП описывают так называемую повторяемость «в среднем» свойств гидрометеорологических процессов.

Математическое ожидание характеризует регулярную компоненту изменений и позволяет найти средний многолетний образ сезонного или месячного хода (что близко к понятию «норма»); дисперсия – отклонение процесса $\xi(t)$ от средней многолетней нормы.

Совместный анализ графиков оценок $m(t)$ и $D(t)$ дает возможность установить тип межгодовой изменчивости процессов. В случае когерентности этих графиков изменчивость происходит в виде амплитудной модуляции, т.е. ослабления или усиления интенсивности основных элементов внутригодового хода, в случае некогерентности – в виде наложения долгопериодного колебания или частично – фазовой модуляции.

Математическое ожидание и дисперсия являются важными, но не исчерпывающими характеристиками СП, так как определяются только одномерным законом распределения и не позволяют учесть характер взаимосвязи между отдельными сечениями. Для учета этой взаимосвязи используется корреляционная функция СП.

Вид функции $K_{\xi}(t, \tau)$ определяет закономерности корреляционных зависимостей межгодовых (при $\tau = 1$ год) или внутригодовых (при $\tau = 1$ месяц) изменений процесса в заданные моменты времени. Оценки функций $m_{\xi}(t)$, $D_{\xi}(t)$,

$K_{\xi}(t, \tau)$ вычисляются по отсчетам, взятым из исходной реализации через период коррелированности, и имеют вид:

$$m_{\xi}^{*}(t) = 1/N \sum \xi(t+kT), \quad (2.2.5)$$

$$D_{\xi}^{*}(t) = 1/N \sum (\xi^{\circ}(t+kT))^2, \quad (2.2.6)$$

$$K_{\xi}^{*}(t, \tau) = 1/N \sum (\xi^{\circ}(t+kT) \xi^{\circ}(t+kT+\tau)) \quad (2.2.7)$$

При использовании исходной информации месячного периода осреднения оценки (2.2.5) – (2.2.7) вычисляются по ежегодным последовательностям значений для каждого месяца года в предположении об их стационарности.

Известно, что дискретный процесс авторегрессии первого порядка $\xi_n = (n\Delta)$, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, полученный дискретизацией непрерывного процесса, описывается разностным уравнением:

$$\xi_n = \phi_1 \xi_{n-1} + \varepsilon_n, \quad (2.2.8)$$

где ε_n – дискретная последовательность белого шума; ϕ_1 – параметр авторегрессии; Δ – интервал дискретизации.

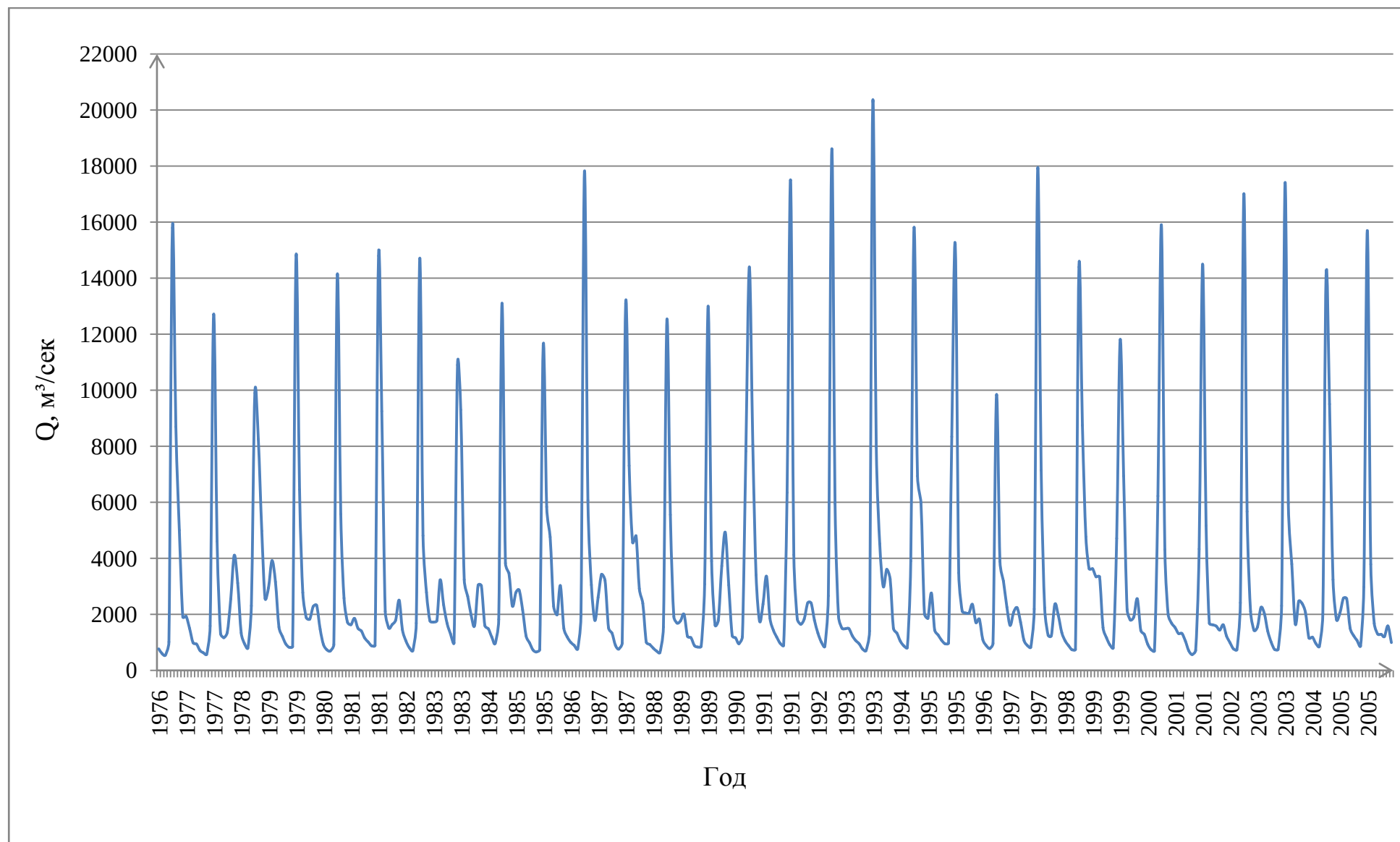


Рисунок 2.2.1 — Реализация среднемесячных расходов воды р. Северная Двина г.п. Усть-Пинега

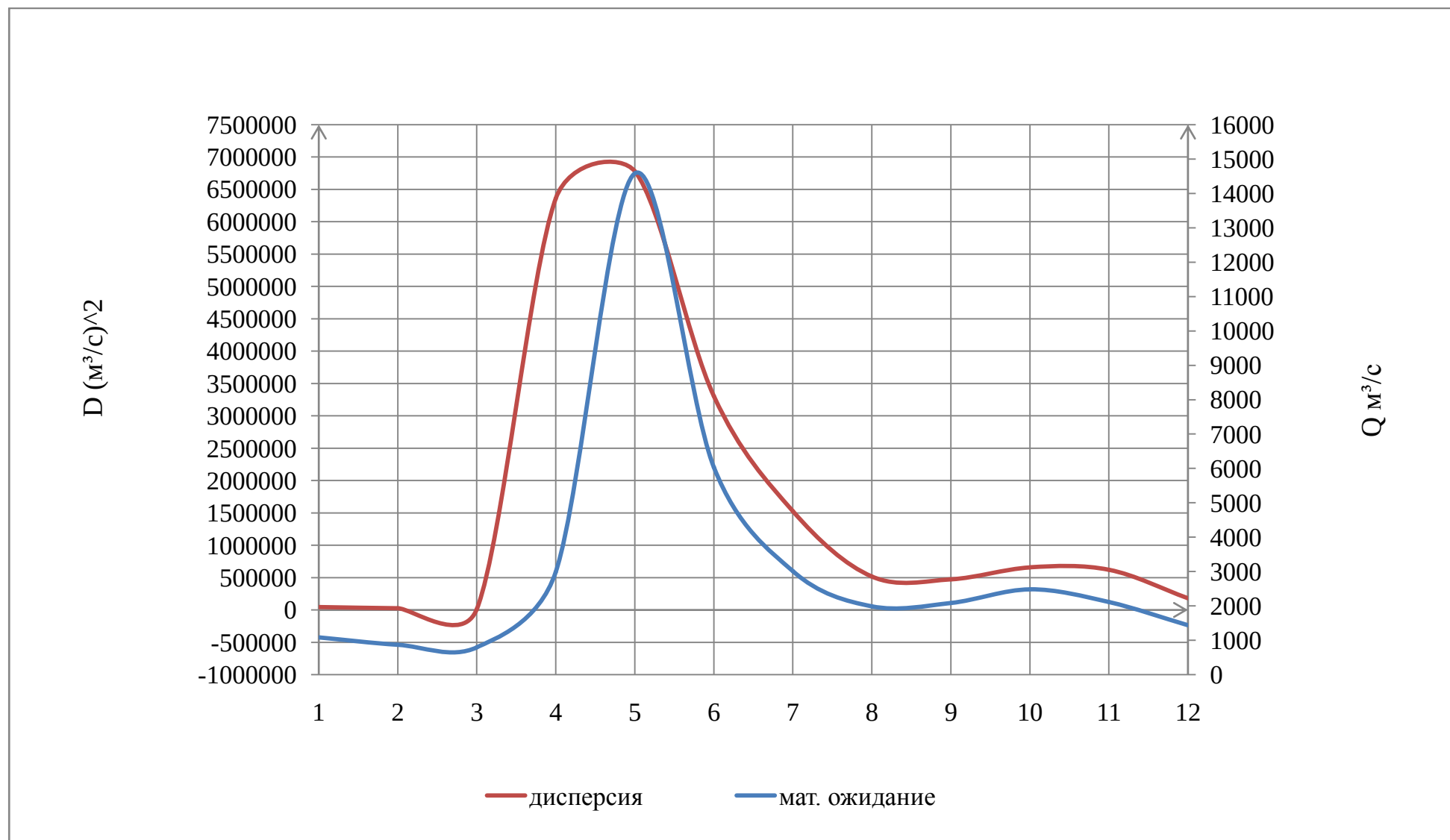


Рисунок 2.2.2— Графики математического ожидания и дисперсии р. Северная Двина – г.п. Усть-Пинега

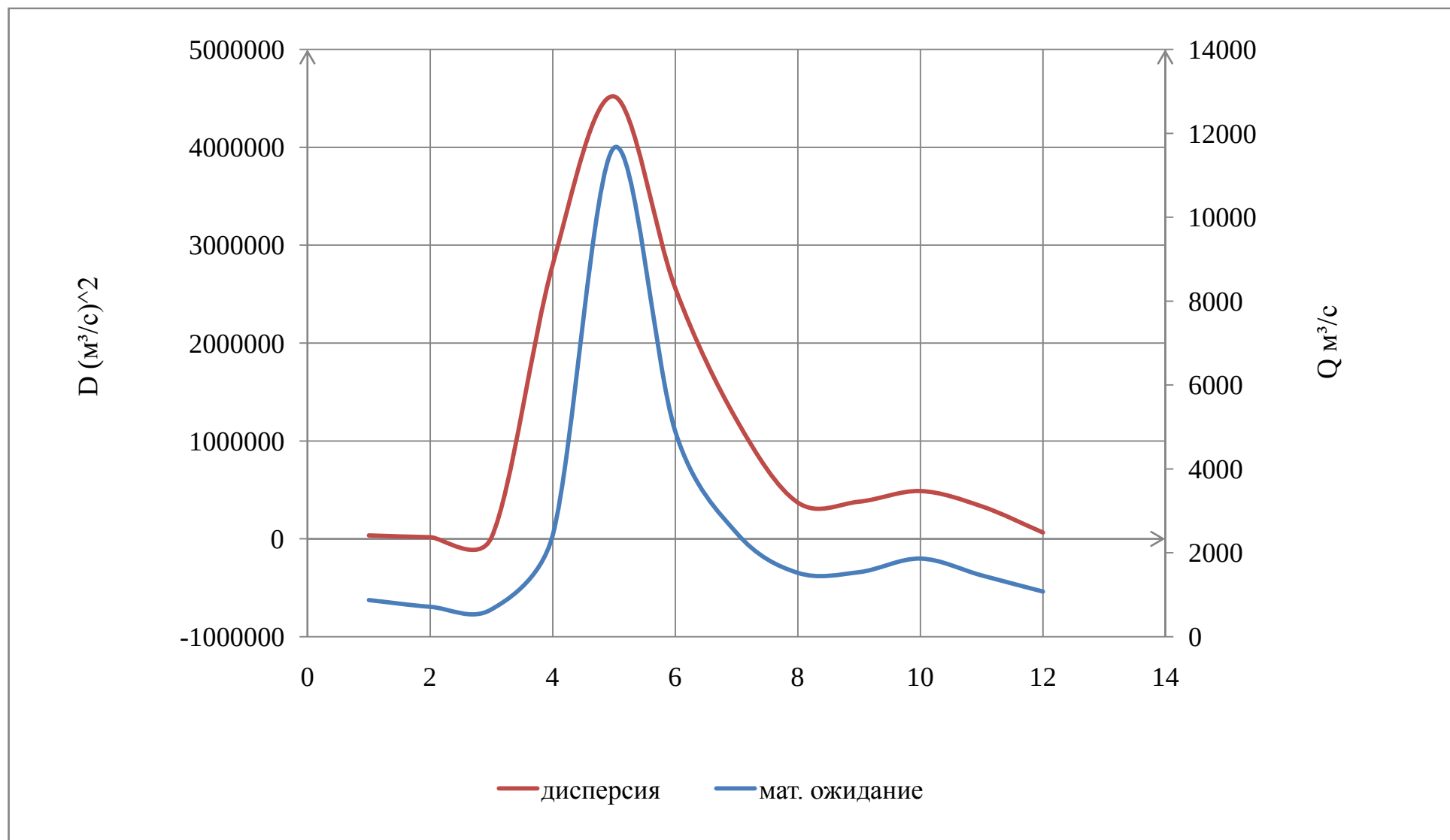


Рисунок 2.2.3— Графики математического ожидания и дисперсии р. Северная Двина – г.п. Звоз

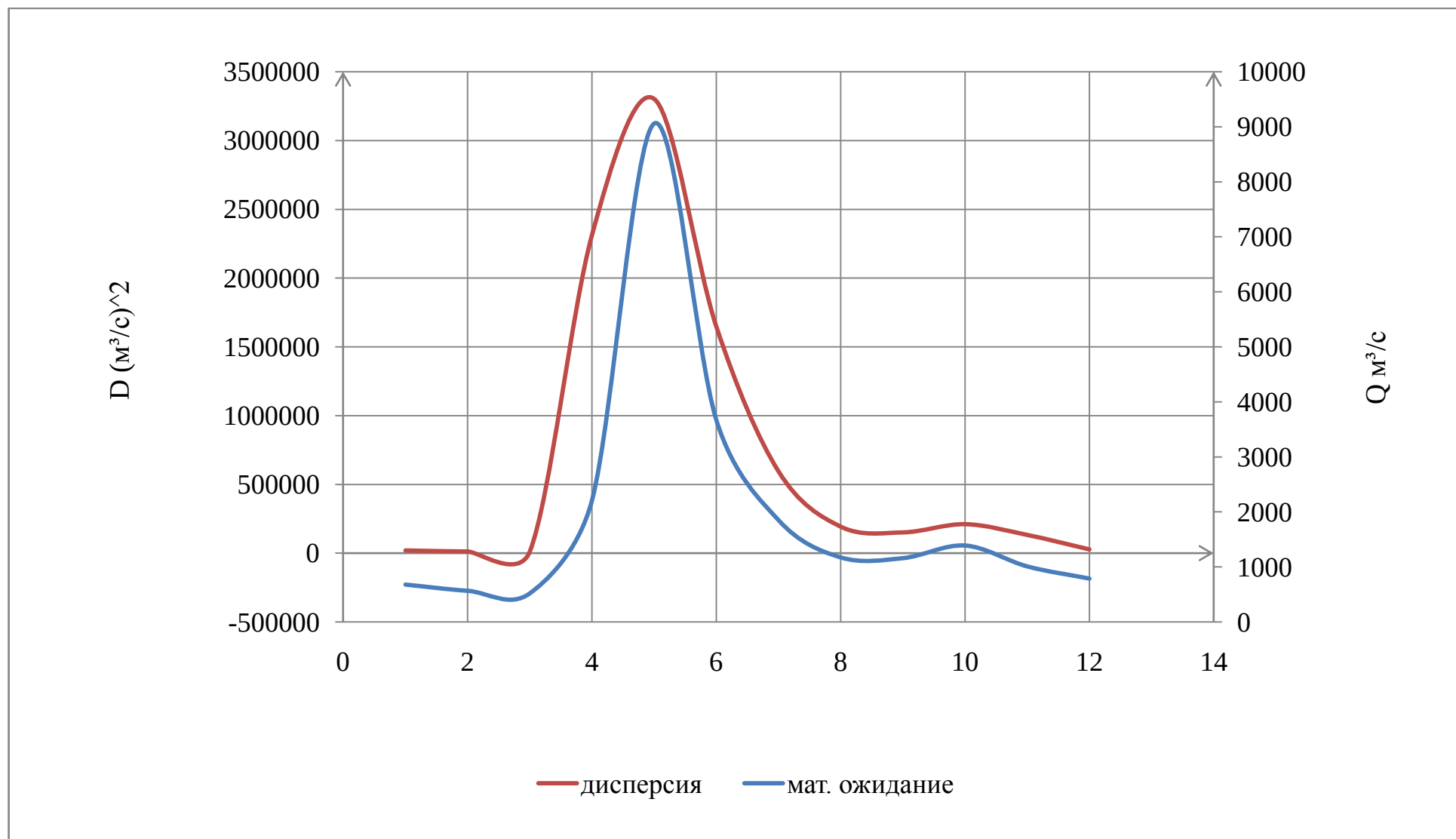


Рисунок 2.2.4— Графики математического ожидания и дисперсии р. Северная Двина – г.п. Абрамково

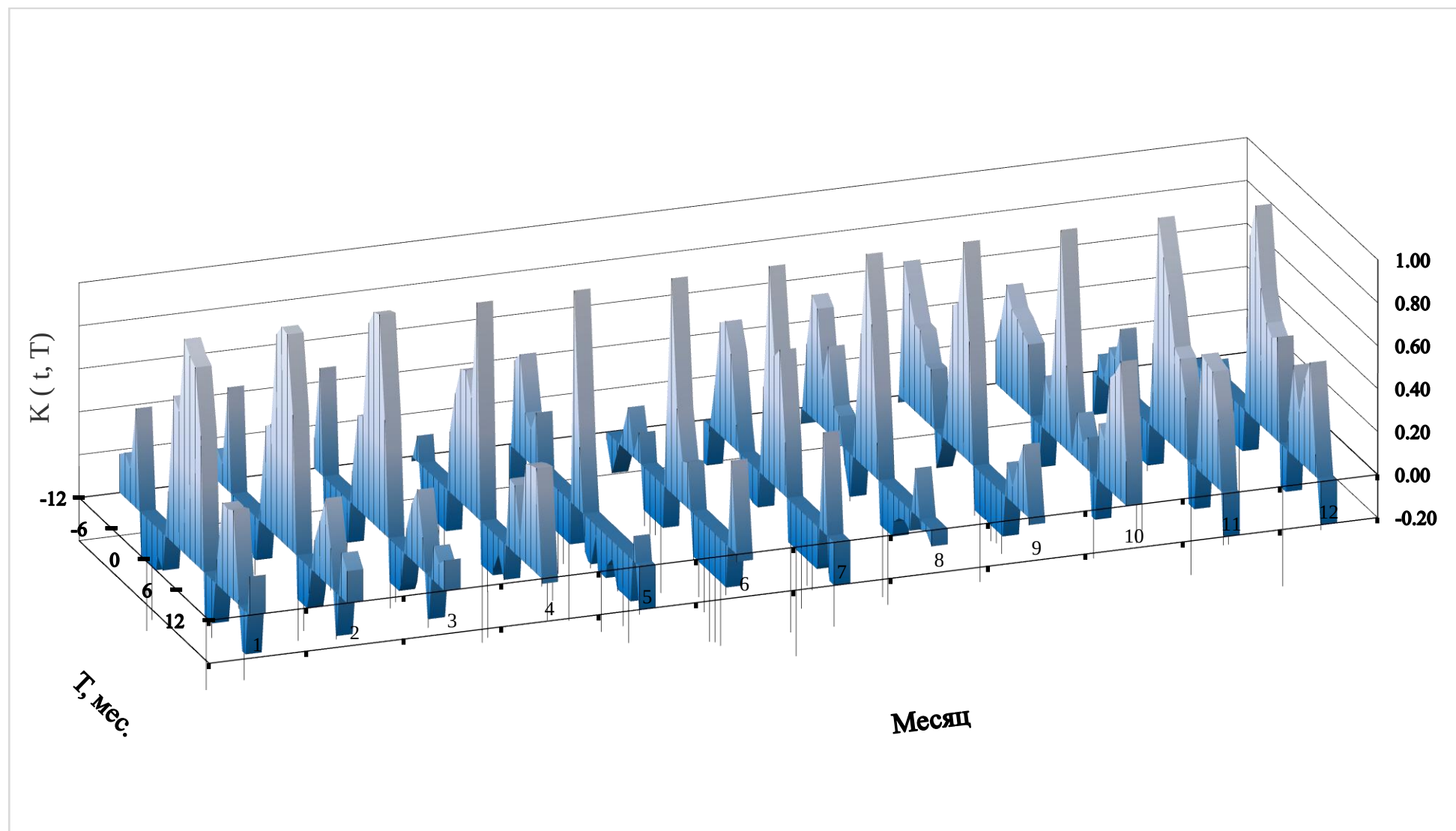


Рисунок 2.2.5— Графики автокорреляционной функции среднемесячных расходов воды р. Северная Двина – г.пУсть-Пинега

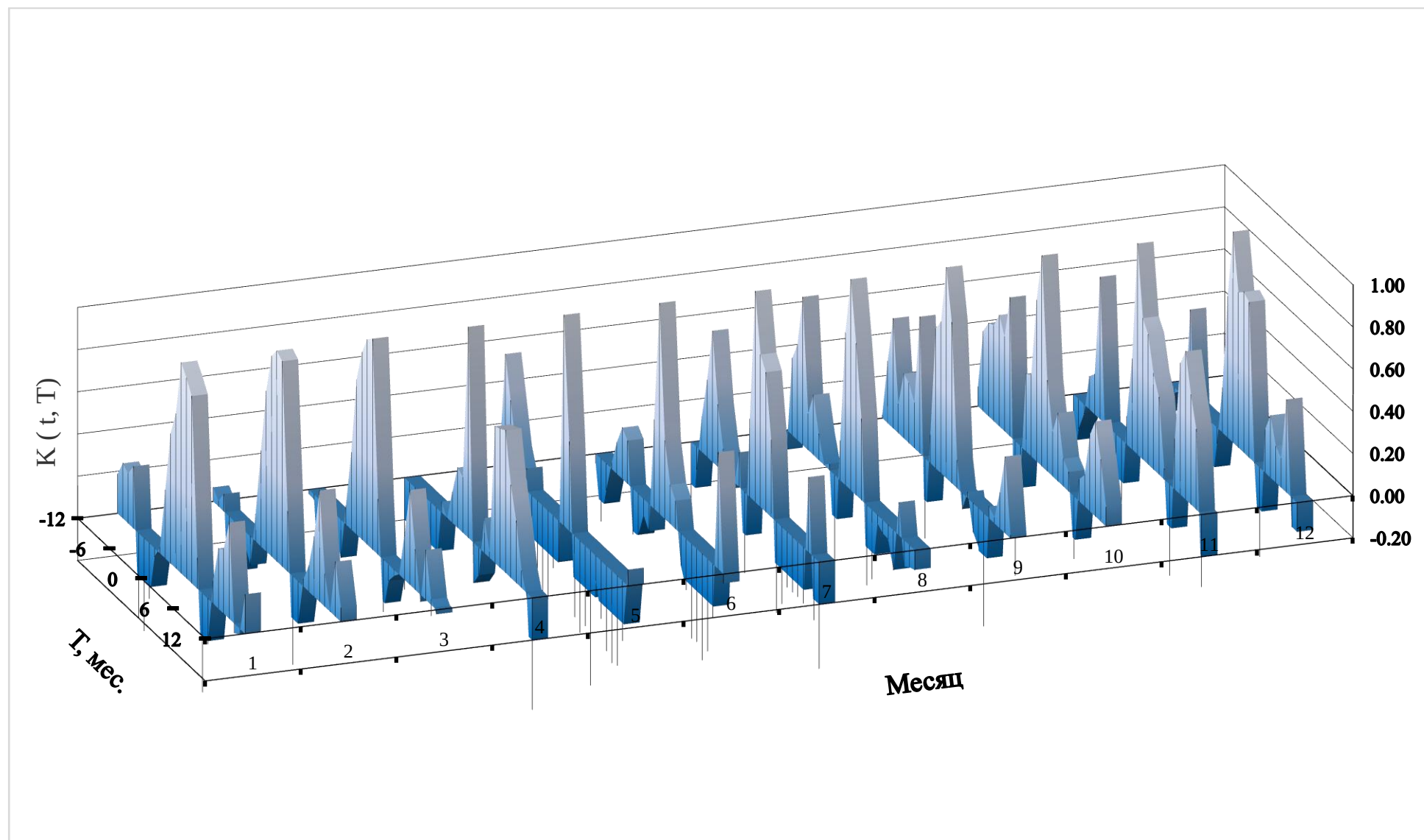


Рисунок 2.2.6 — Графика автокорреляционной функции среднемесячных расходов воды. Северная Двина—г.п Звоз

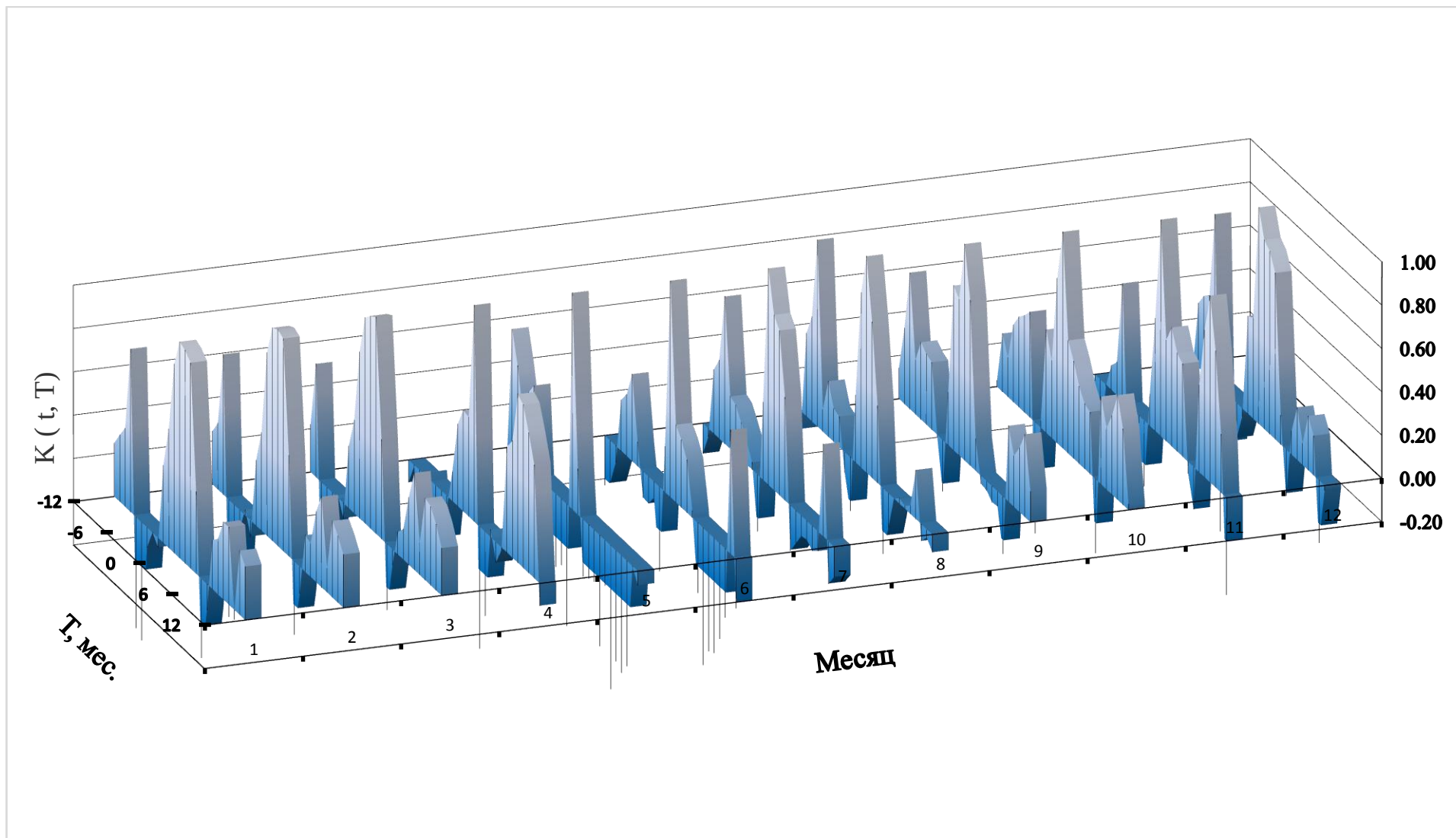


Рисунок 2.2.7— Графики автокорреляционной функции среднемесячных расходов водыр. Северная Двина

г.п Абрамково

Графики оценок математического ожидания $m(t)$ стока р. Северная Двина имеют вид кривых с ярко выраженным максимумом в период весеннего половодья (апрель – май) и вторичным небольшим подъемом в период осеннего паводка (октябрь). Минимумы на кривых $m(t)$ соответствуют зимней и летней межени. Кривые дисперсии $D(t)$ повторяют все особенности кривых $m(t)$. Когерентный ход графиков оценок $m(t)$ и $D(t)$ свидетельствуют о межгодовой изменчивости анализируемых процессов преимущественно в виде амплитудной модуляции характерных элементов внутригодового хода.

Графики оценок корреляционных зависимостей внутригодовой изменчивости $K(t, \tau)$, $\tau=1$ месяц (рисунок 2.2.5 – 2.2.7) на представленных участках реки Северная Двина достаточно быстро затухают на начальном участке и продолжают флуктуировать с незначительными отклонениями от нулевого уровня в дальнейшем. Графики оценок внутригодовых корреляционных зависимостей стока реки практически симметричны и одинаковы для всех месяцев года.

3 Режим солености устьевой области р. Северная Двина

Устьевое взморье реки является самым динамичным районом моря. В нем отмечаются наибольшие пространственно-временные изменения всех гидрологических и гидрохимических характеристик. Одной из таких характеристик является соленость.

Различают кратковременные, сезонные, многолетние и вековые виды проникновения соленых вод на устьевой участок реки.

Кратковременные (непериодические и периодические) связаны со сгонно-нагонными и приливными явлениями. Короткопериодные колебания дальности проникновения соленой воды под влиянием приливов составляют ± 3 км, под влиянием нагонов и сгонов эти колебания увеличиваются до $\pm 5-7$ км. Вековые изменения зоны смещения обусловлены процессами дельтообразования. В данной работе эти изменения не рассматривались. Однако известно, что отложения транспортируемых рекой наносов в устье формируют мелководные устьевые бары, являющиеся препятствием для проникновения соленой воды в реку.

Многолетний анализ данных наблюдений над соленостью показывает, что соленость подвержена значительным изменениям по пространству устьевого взморья под влиянием приливов. Причины резкой изменчивости солености заключаются в смене водных масс за период приливо-отливного цикла.

Колебания солености в течение приливо-отливного цикла имеют хорошую связь с колебаниями уровня воды. Максимум солености обычно совпадает с моментами полных вод, минимум солености соответствует моментам малых вод как видно на рисунках 3.2 – 3.5, построенным по данным разреза пр. Маймакса на станции №7 сотрудниками устьевой станции за период от 1990 по 2012 год.

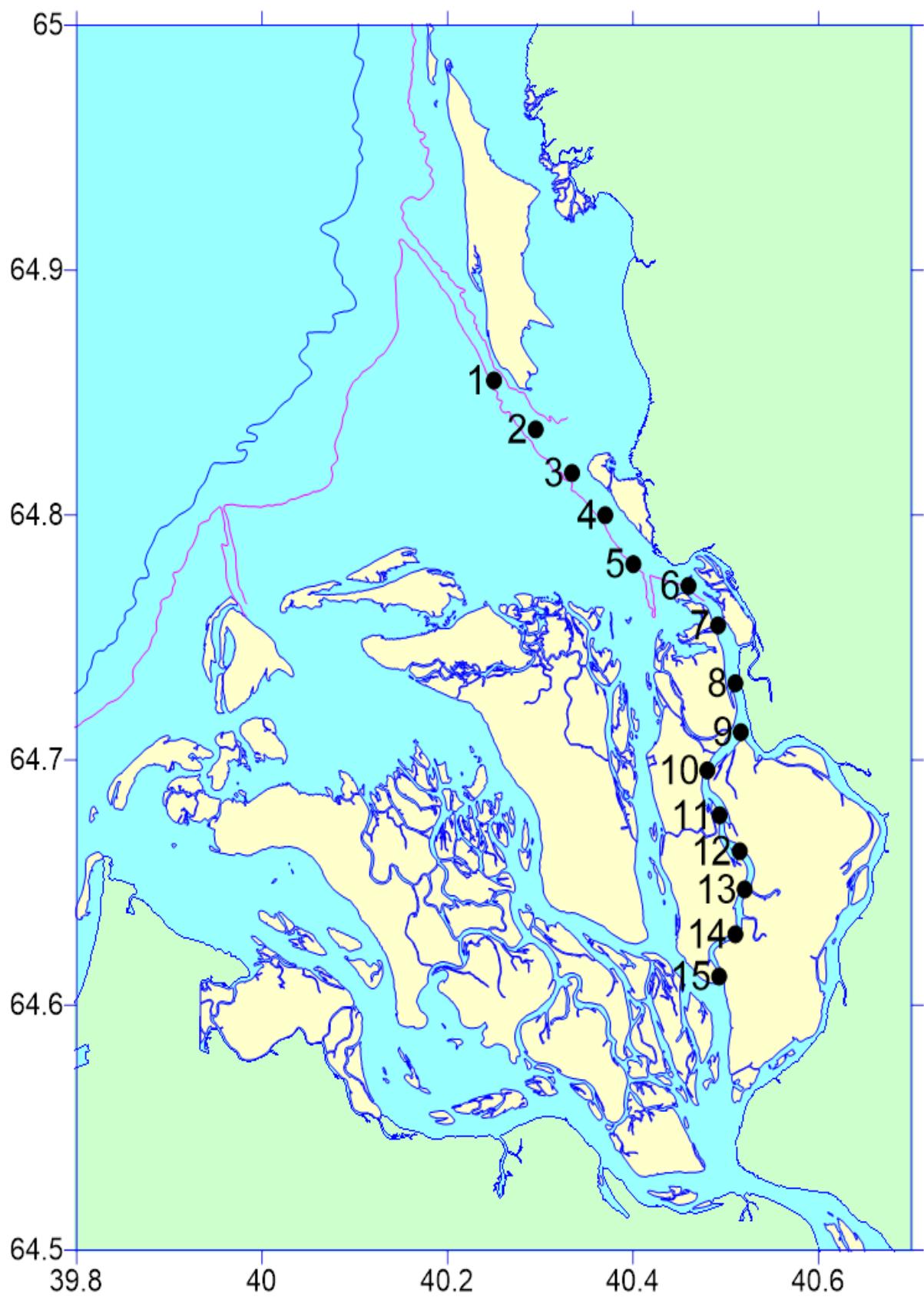


Рисунок 3.1 — Схема расположения станций по Маймаксанскому рукаву

Таблица 3.1 — Местоположение станций гидрологического разреза в протоке Маймакса

Номер станции	Координаты: широта, С долгота, В	Береговые ориентиры	Расстояние от станции №1, км
Входной фарватер пр. Маймакса			
1	64° 51' 18" 40° 15' 00"	о.Мудьюг (Черная Башня)	0.0
2	64° 50' 06" 40° 17' 42"		2.0
3	64° 49' 02" 40° 20' 03"	о. Лебедин	4.5
4	64° 48' 00" 40° 22' 12"	Устьянские поворотные створы	6.8
5	64° 46' 48" 40° 24' 01"	Муровые поворотные створы	9.3
6	64° 46' 16" 40° 27' 35"	д. Лапоминка	12.4
7	64° 45' 18" 40° 29' 30"	д. Чижевка	14.9
8	64° 43' 53" 40° 30' 37"	р. Старая Ижма	17.6
9	64° 42' 41" 40° 30' 58"	п. Экономия	20.4
10	64° 41' 45" 40° 28' 48"	Обратные Реушинские створы	22.9
11	64° 40' 39" 40° 29' 36"	Лесозавод № 24	24.5
12	64° 39' 46" 40° 30' 54"	Нижние Повракульские створы	26.9
13	64° 38' 50" 40° 31' 13"	Гидролизный завод	28.4
14	64° 37' 44" 40° 30' 37"	Лесозавод № 21	30.8
15	64° 36' 42" 40° 29' 34"	Лесозавод № 14	33.6

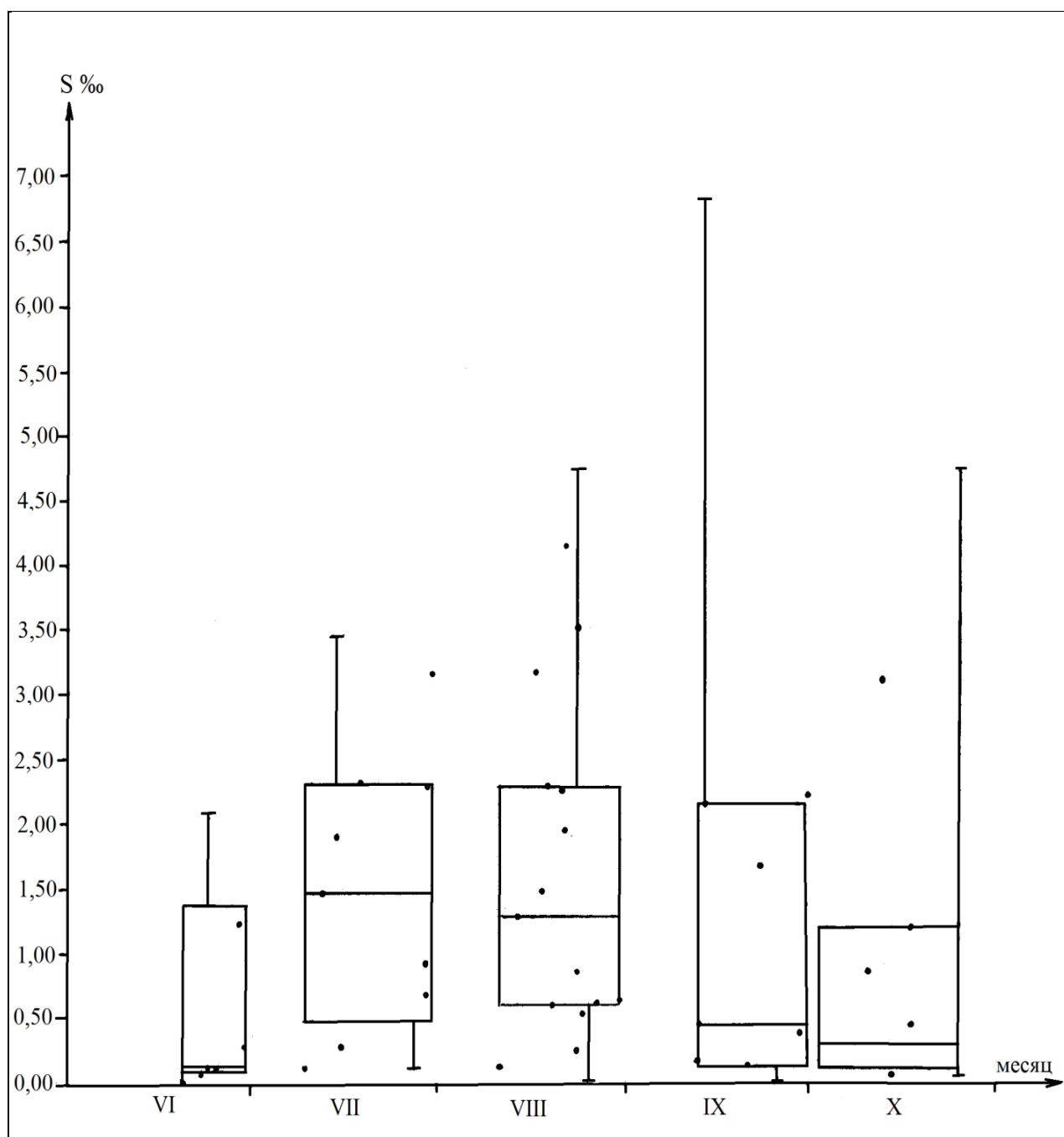


Рисунок 3.2 — Квантильный анализ на разрезе пр. Маймакса на малой воде за период с 1990 по 2012 гг. станция № 7 д. Чижовка (поверхность)

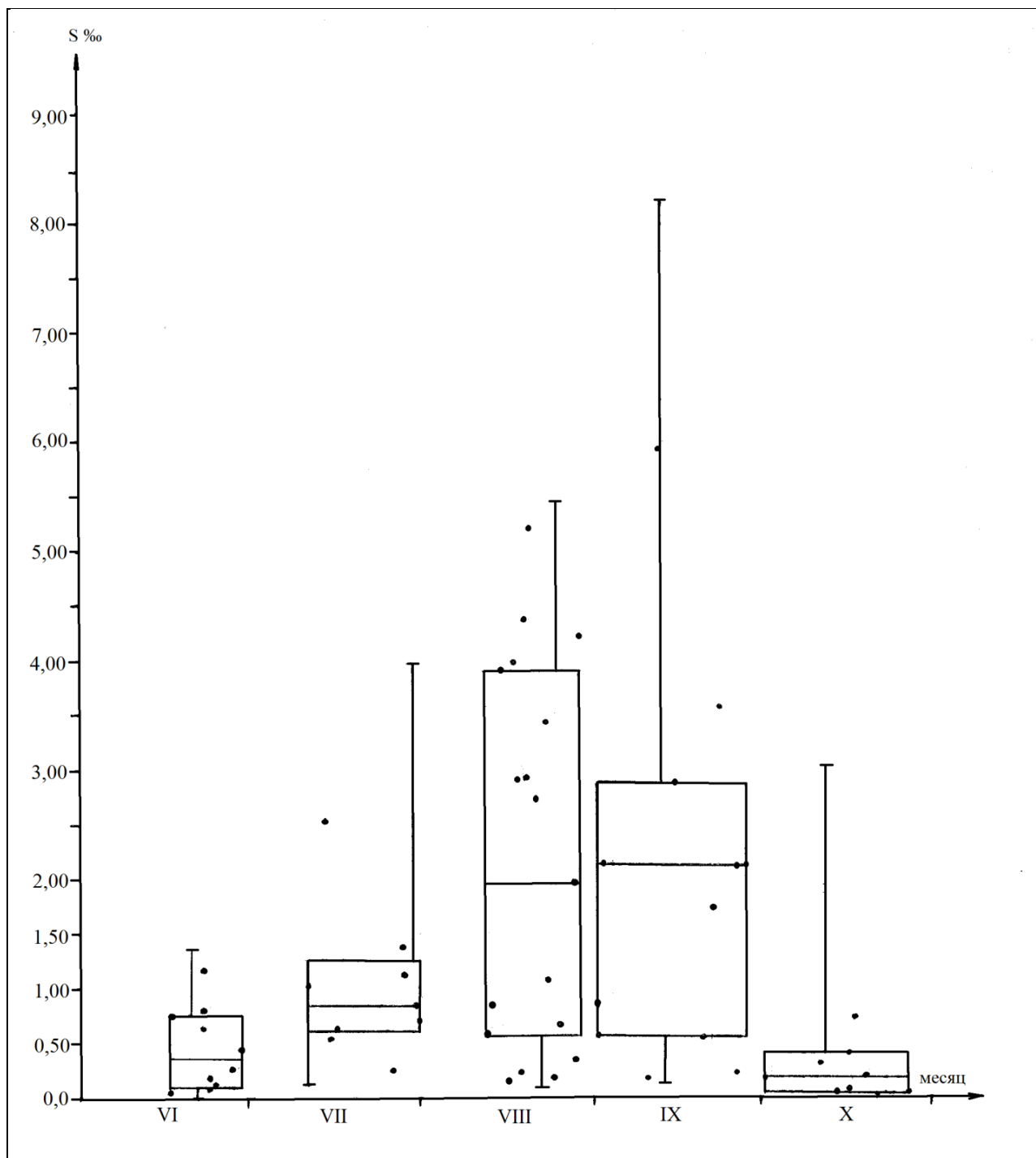


Рисунок 3.3 —Квантильный анализ на разрезе пр. Маймакса на полной воде за период с 1990 по 2012 гг. станция № 7 д. Чижовка (поверхность)

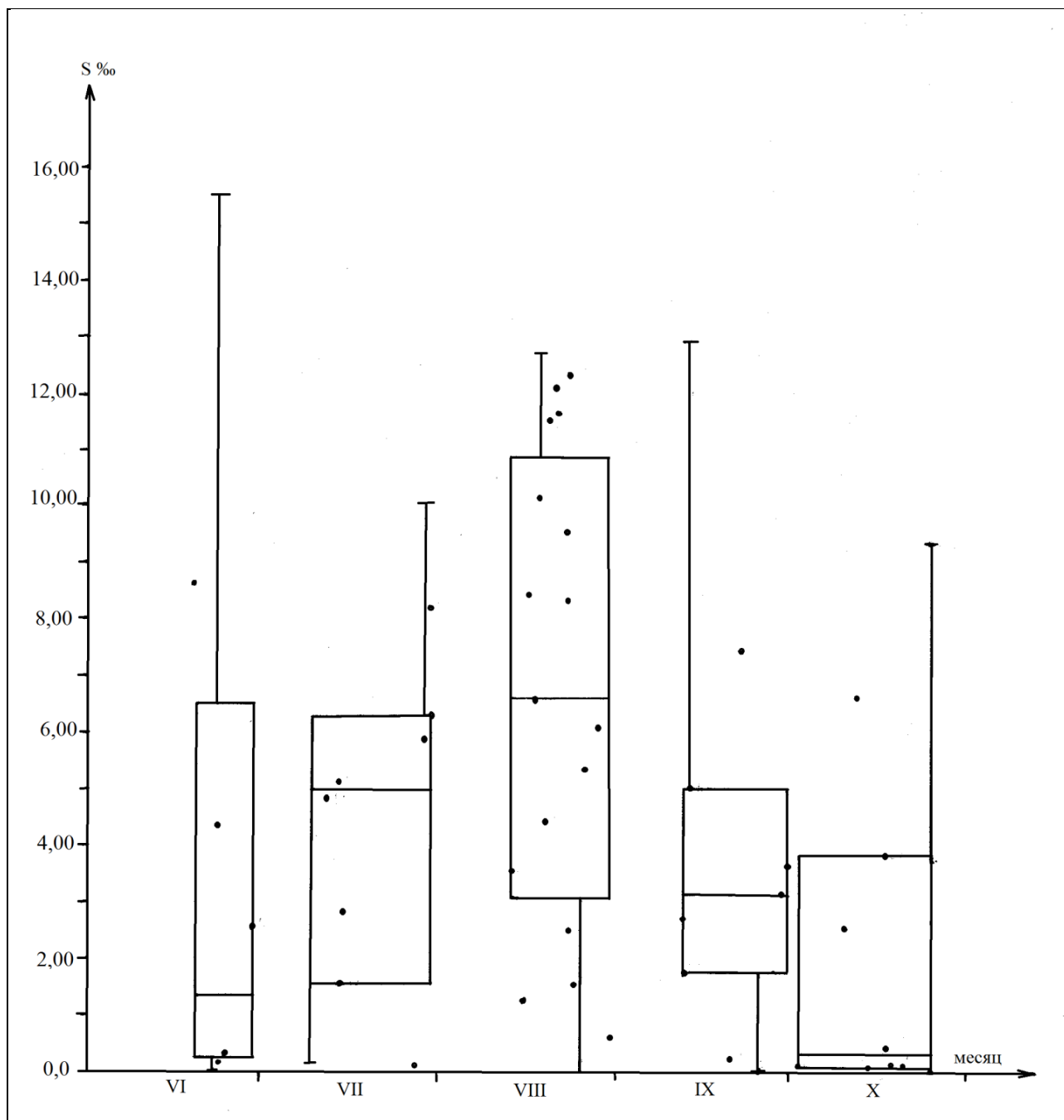


Рисунок 3.4 —Квантильный анализ на разрезе пр. Маймакса на малой воде за период с 1990 по 2012 гг. станция № 7 д. Чижовка (дно)

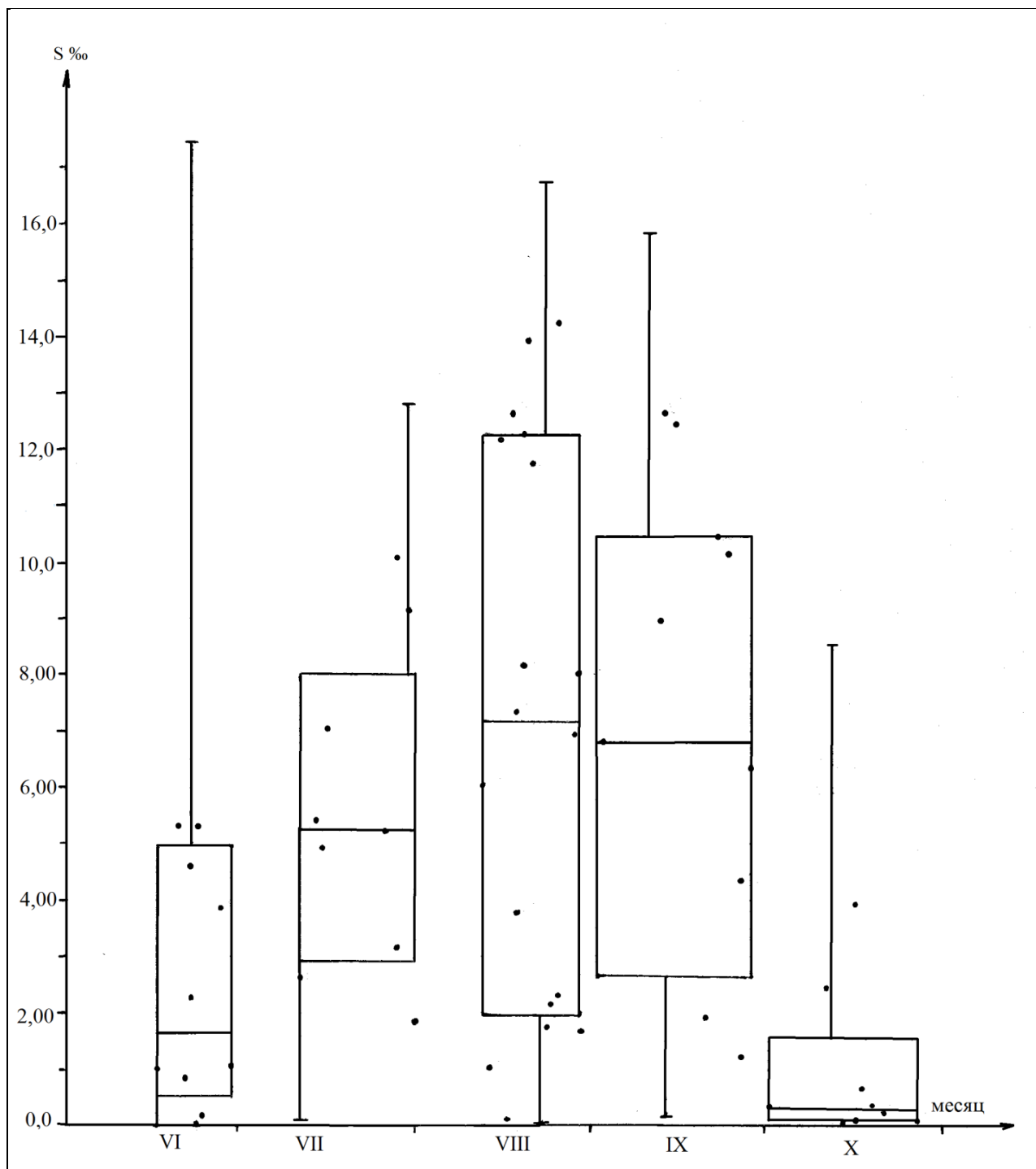


Рисунок 3.5 — Квантильный анализ на разрезе пр. Маймакса на полной воде за период с 1990 по 2012 гг. станция № 7 д. Чижовка (дно)

На максимум солености по времени приливо-отливные явления не влияют. Максимум в поверхностном слое приходится как при полной, так и при

малой воде на сентябрь, в октябре соленость снова понижается, что связано с увеличением речного стока, однако в большинстве случаев распространение речных вод на взморье существенно ограничивается преобладающими нагонными ветрами. Наибольшие амплитуды колебаний солености в поверхностном слое соответствуют нагонным ветрам, а в придонных горизонтах – сгонным. Причиной выбросов, которые можно наблюдать на рисунках, могут быть именно эти явления.

3.1 Межгодовая изменчивость солености

Многолетняя изменчивость солености на взморье Северной Двины связана прежде всего с аналогичными изменениями стока и с изменениями в водообмене между Баренцевым и Белым морями через Горло, хотя как показывают наблюдения, существенных изменений величины стока, которые могли бы повлиять на изменение солености вод взморья, не наблюдались. В то же время вследствие медленного поднятия дна, глубина в Горле Белого моря уменьшается и уменьшается количество поступающих из Баренцева моря вод с большой соленостью. Анализ данных наблюдений на стандартных гидрологических разрезах показал, что на взморье Северной Двины произошло уменьшение солености придонных вод примерно на 1,0 – 1,5 % за 40 лет. Это значит, что многолетняя изменчивость весьма мала.

Для оценки многолетней изменчивости применен квантильный анализ среднегодовых значений солености и корреляционный анализ ежегодных последовательностей значений солености для каждого месяца года по береговым станциям: о. Мудьюг, г. Северодвинск, Зимнегорский маяк. Ординаты автокорреляционных функции ежегодных значений солености воды приведены в приложении И. Расстояние от Архангельска (пост

Соломбала): Зимнегорский маяк около 108 км, о. Мудьюг 33 км и г. Северодвинск 31км.

Морские станции:

МГ-2 о. Мудьюг

Гидрометеостанция расположена на южной оконечности о. Мудьюг, лежащего в восточной части Двинского залива, в районе устьевого взморья р. Северная Двина. С восточной стороны остров отделяется от материка мелководной губой «Сухое море».Измерения температуры воды и отбор проб на соленость производятся в Сухом море, в створе уровня поста. Глубина места от 0.5 до 1.5м. На температуру и соленость в районе наблюдений оказывает влияние сток реки Северная Двина.

МГ-2 Зимнегорский маяк

Гидрометеостанция расположена на Зимнем берегу Белого моря, на мысу того же названия. Измерения температуры воды и отбор проб на соленость производятся у берега, в 100м к северу от ручья, в 300м к ЮЗ от метеоплощадки. Глубина места от 0.5 до 0.7м. На температурный и солевой режим района оказывает влияние сток р. Северная Двина и ручья Каменный.

МГ-2 г. Северодвинск

Гидрометеостанция находится в северо-западной части города Северодвинска, в 7км от побережья моря.Прилагающий район моря мелководен, с множеством островов. Наиболее крупным является о.Ягры, образующий с материковым берегом в устье Никольского рукава Северодвинскую гавань, которая соединяется с открытым морем каналом глубиной от 8 до 10м.

Измерения температуры воды и отбор проб на соленость производятся в 90м к З от дамбы. Глубина места от 0.9 до 2.5м. На температуру и соленость в районе наблюдений оказывает влияние сток р. Северная Двина.

Квантильный анализ показал наличие групп лет с повышенной и пониженной соленостью на анализируемых станциях, которые наблюдались как разрозненно, так и группировались в фазы и циклы. Например для лет с повышенной соленостью это 1987 – 1989 гг (о. Мудьюг); 1989 – 1991 гг (Зимнегорский маяк); 1980 – 1981 и 1987 – 1989 гг (г. Северодвинск). Для лет с пониженной соленостью это 2003 – 2004 гг (о. Мудьюг); 2001 – 2004 гг (Зимнегорский маяк); 1993 – 1994 гг (г. Северодвинск). Лет с экстремально пониженной соленостью за рассматриваемый период не было. Наблюдался 1988 год с экстремально повышенной соленостью на станции о. Мудьюг. Этот год входит в число маловодных лет, что подтверждает гипотезу о влиянии стока на соленость воды.

Результаты квантильного анализа многолетней изменчивости приведены в таблице 2.1.3 и рисунках 2.1.2 – 2.1.4.

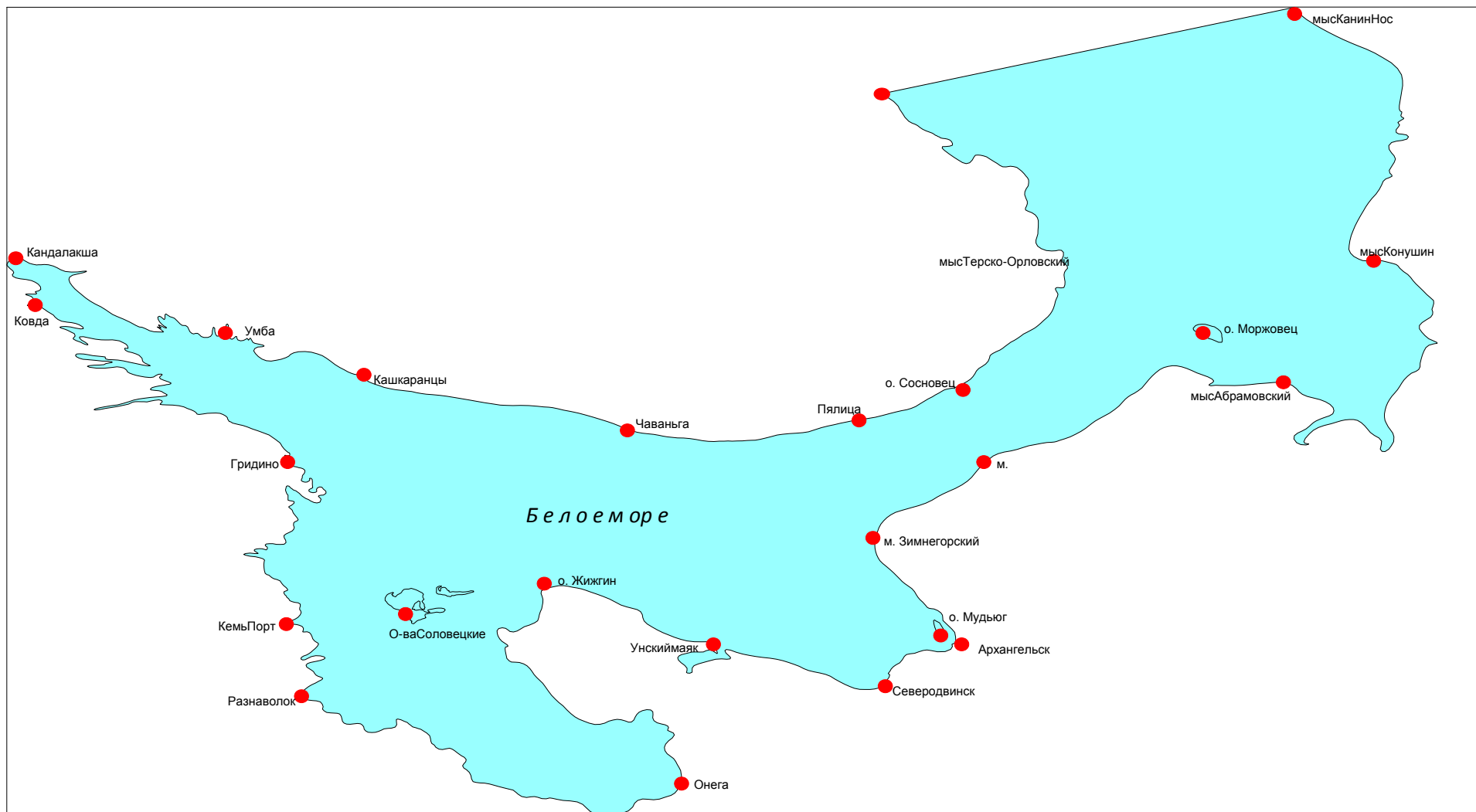


Рисунок 3.1.1 — Схема расположения гидрологических станций открытого моря

Таблица 3.1.1 — Сведения о годах с повышенной соленостью устьевой области

Годы с повышенной соленостью		
МГ-2 о. Мудьюг $S > 5.74$	МГ-2 Зимнегорский маяк $S > 24.61$	МГ-2 г. Северодвинск $S > 18.91$
1977, 1981, 1987–1989, 1992, 2000	1989–1991, 1993, 1997	1977, 1980– 1981, 1984, 1987– 1989
Годы с экстремально повышенной соленостью		
1988	—	—

Таблица 3.1.2 — Сведения о годах с пониженной соленостью устьевой области

Годы с пониженной соленостью		
МГ-2 о. Мудьюг $S < 4.25$	МГ-2 Зимнегорский маяк $S < 23.63$	МГ-2 г. Северодвинск $S < 17.23$
1978, 1986, 1994, 1996, 1998, 2003 – 2004	1986, 2001–2004,	1978, 1990, 1993 – 1994, 1999, 2003, 2005
Годы с экстремально пониженной соленостью		
—	—	—

Таблица 3.1.3 — Статистические характеристики межгодовой изменчивости

Название моря и пункта	Кол- тволет	$S_{\min}$	$S_{0.25}$	$S_{0.5}$	$S_{0.75}$	$S_{\max}$	R	Q	$S_{\text{в.}}$	$S_{\text{н.}}$	T	A_s
Белое море МГ-2о. Мудьюг	30	3.27	4.25	4.98	5.74	9.86	6.59	1.49	7.98	2.02	4.99	-0.06
Белое море МГ-2 Зимнегорский маяк	21	22.20	23.63	24.12	24.61	25.21	3.01	0.98	26.08	22.16	24.12	0.00
Белое море МГ-2г.Северодвинск	30	15.13	17.23	18.0	18.91	20.03	4.90	1.68	21.43	14.71	18.04	0.04

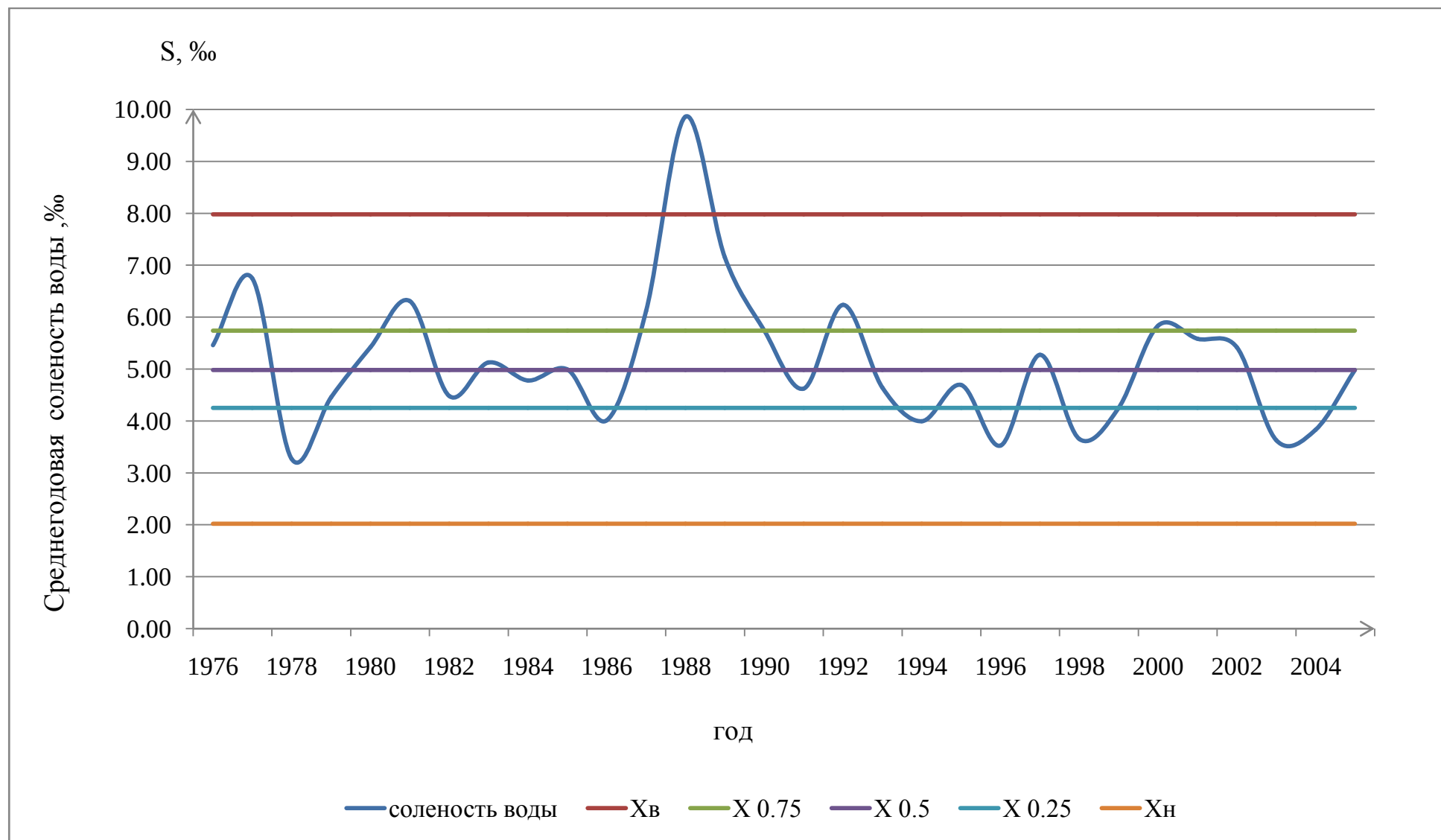


Рисунок 3.1.2— Квантильный анализ рядов среднегодовых значений солености воды на МГ-2 о. Мудьюг

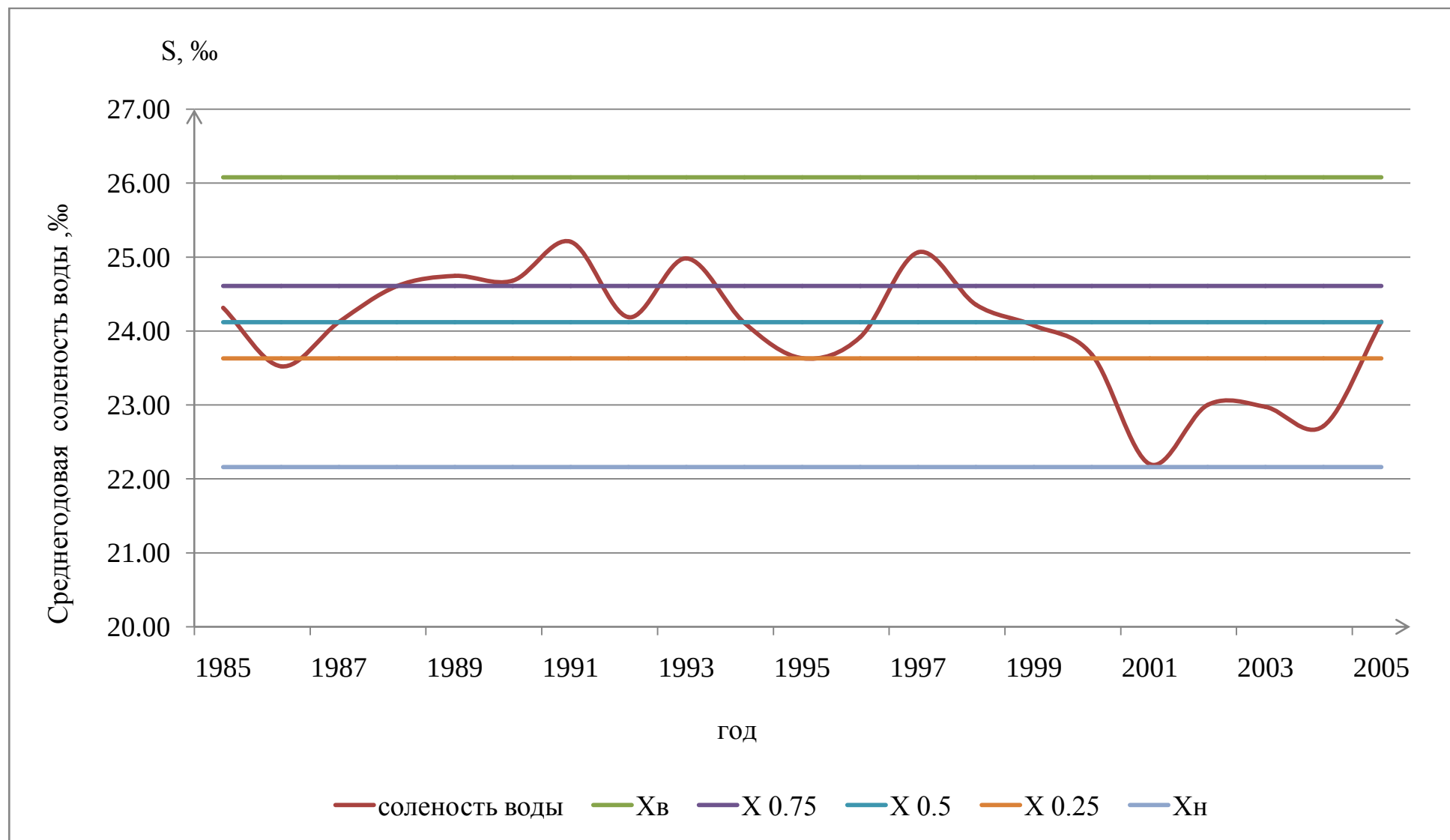


Рисунок 3.1.3— Квантильный анализ рядов среднегодовых значений солёности воды на МГ-2 Зимнегорский маяк

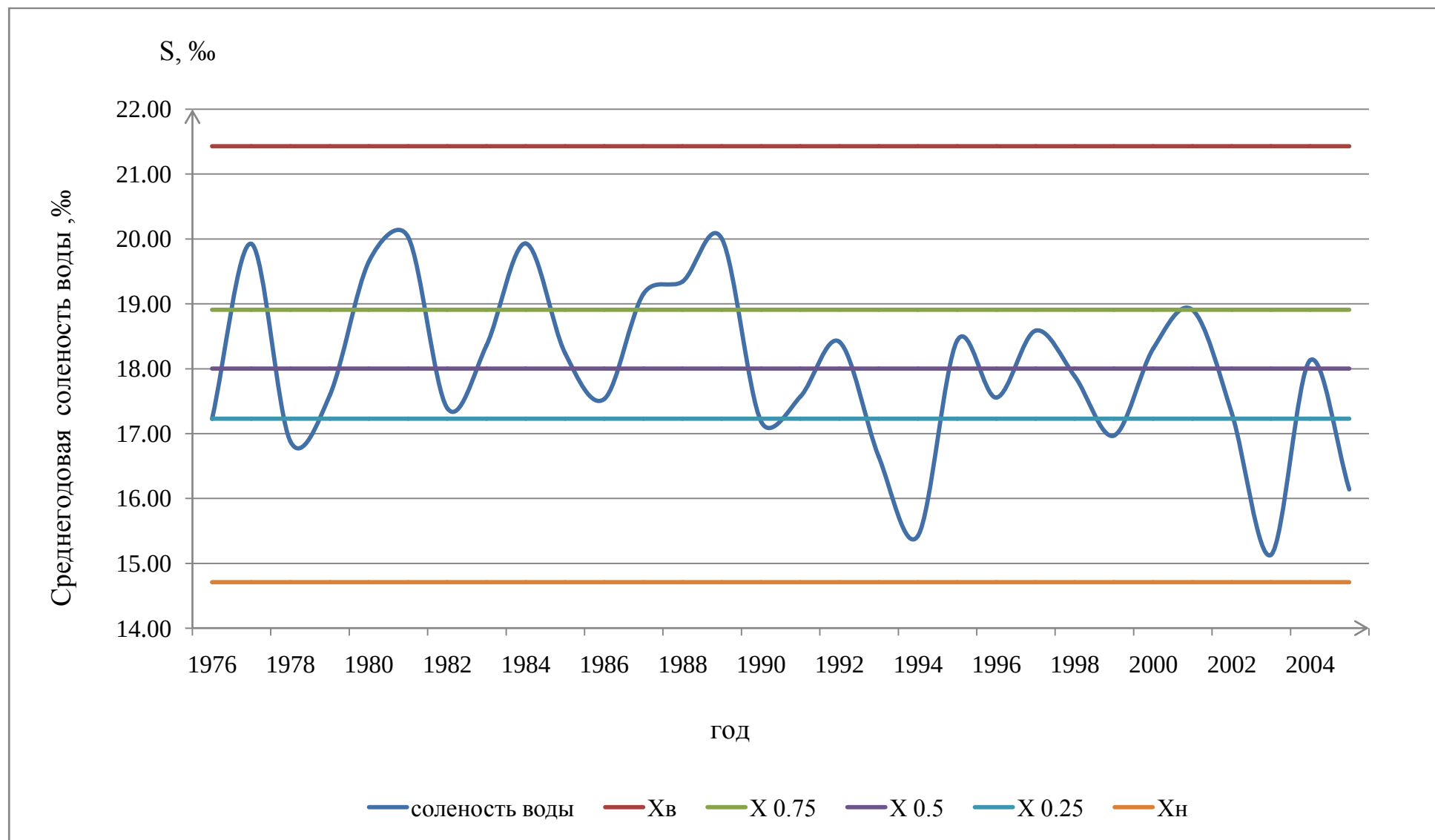


Рисунок 3.1.4— Квантильный анализ рядов среднегодовых значений солености воды на МГ-2 г. Северодвинск

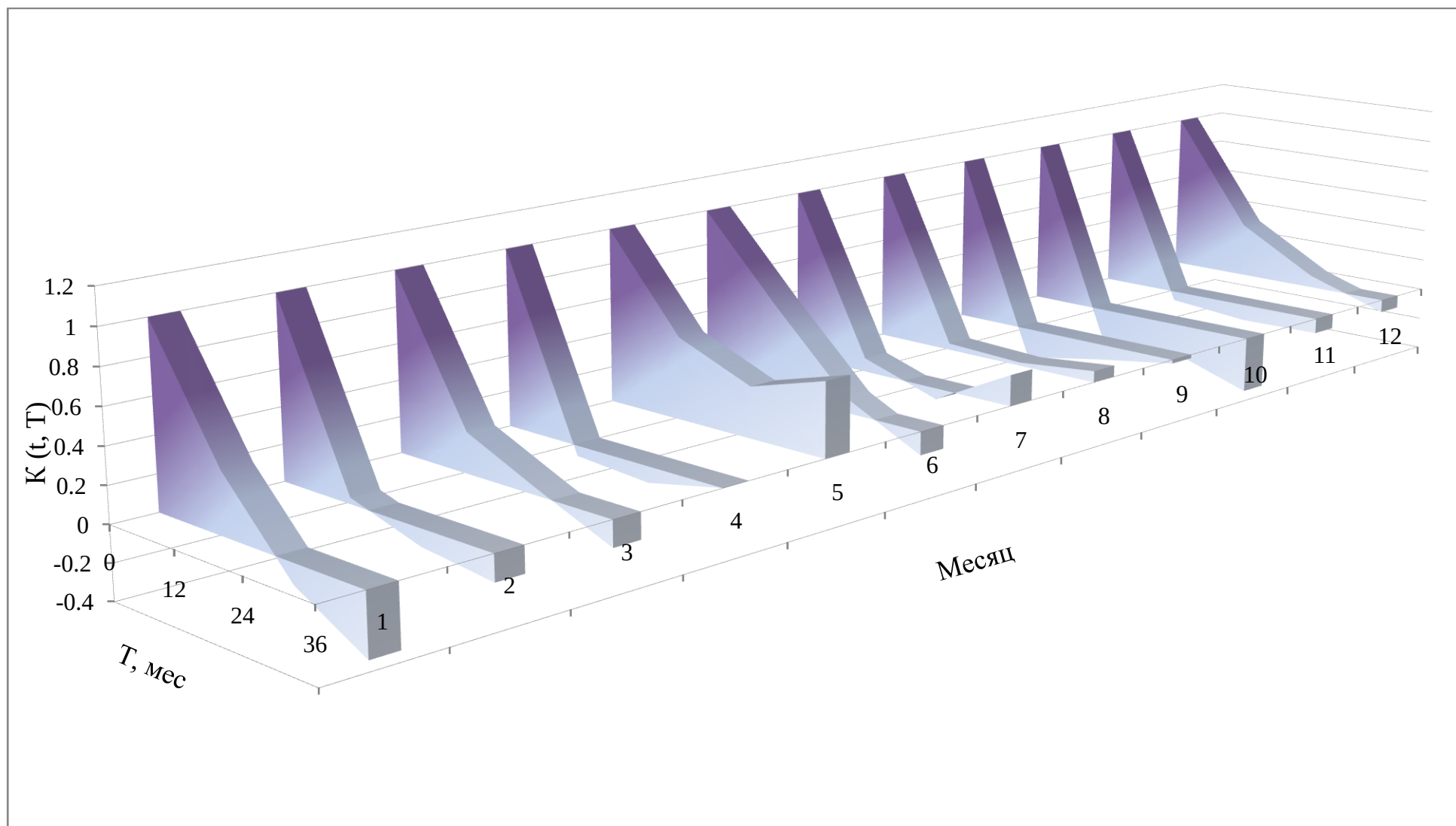


Рисунок 3.1.5— Графики оценок корреляционных функций ежегодных последовательностей значений солёности воды для всех месяцев года МГ-2 о. Мудьюг (с 1976 по 2005 гг)

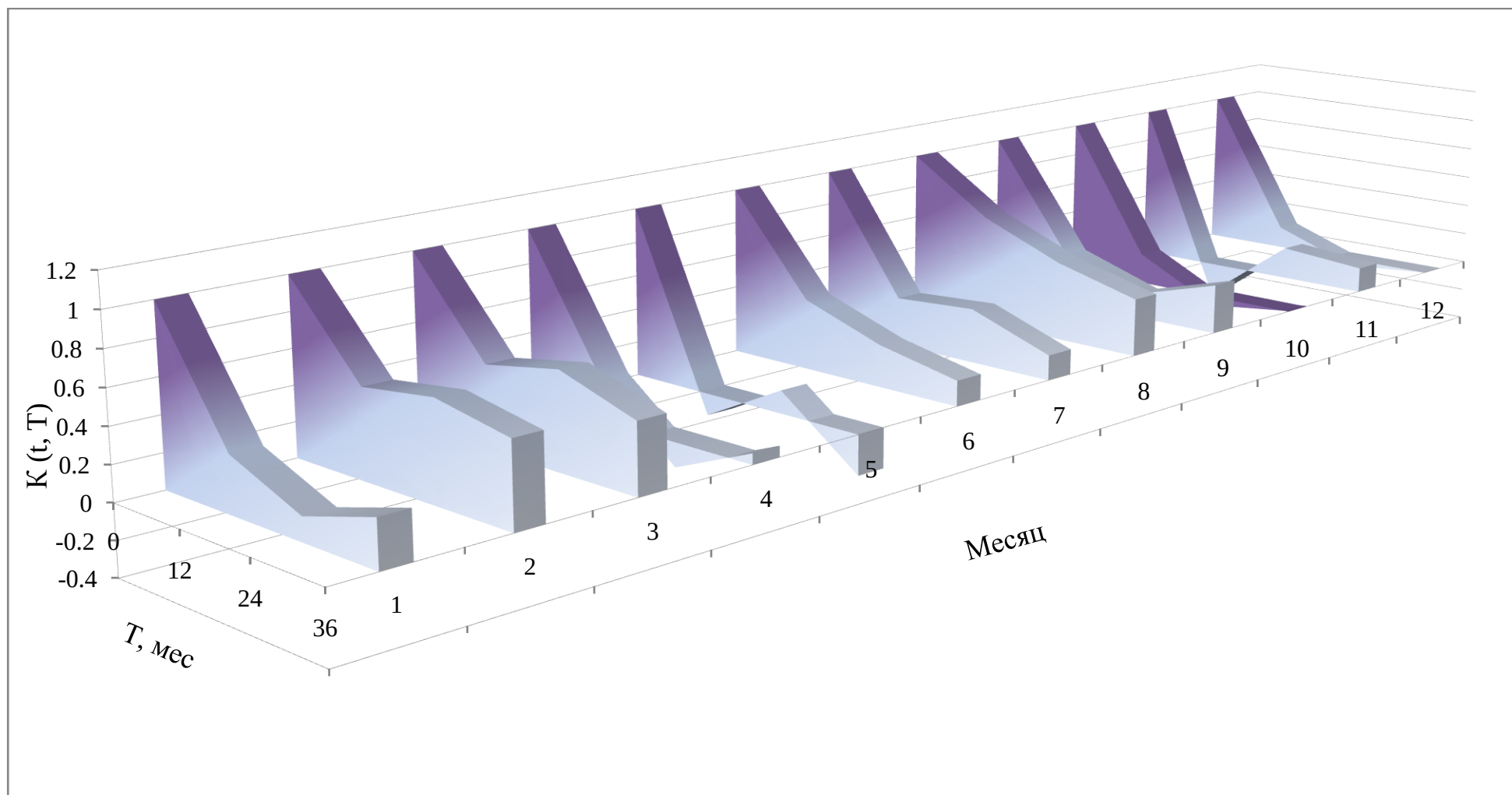


Рисунок 3.1.6— Графики оценок корреляционных функций ежегодных последовательностей значений солёности воды для всех месяцев года МГ-2 Зимнегорский маяк(с 1985 по 2014 гг)

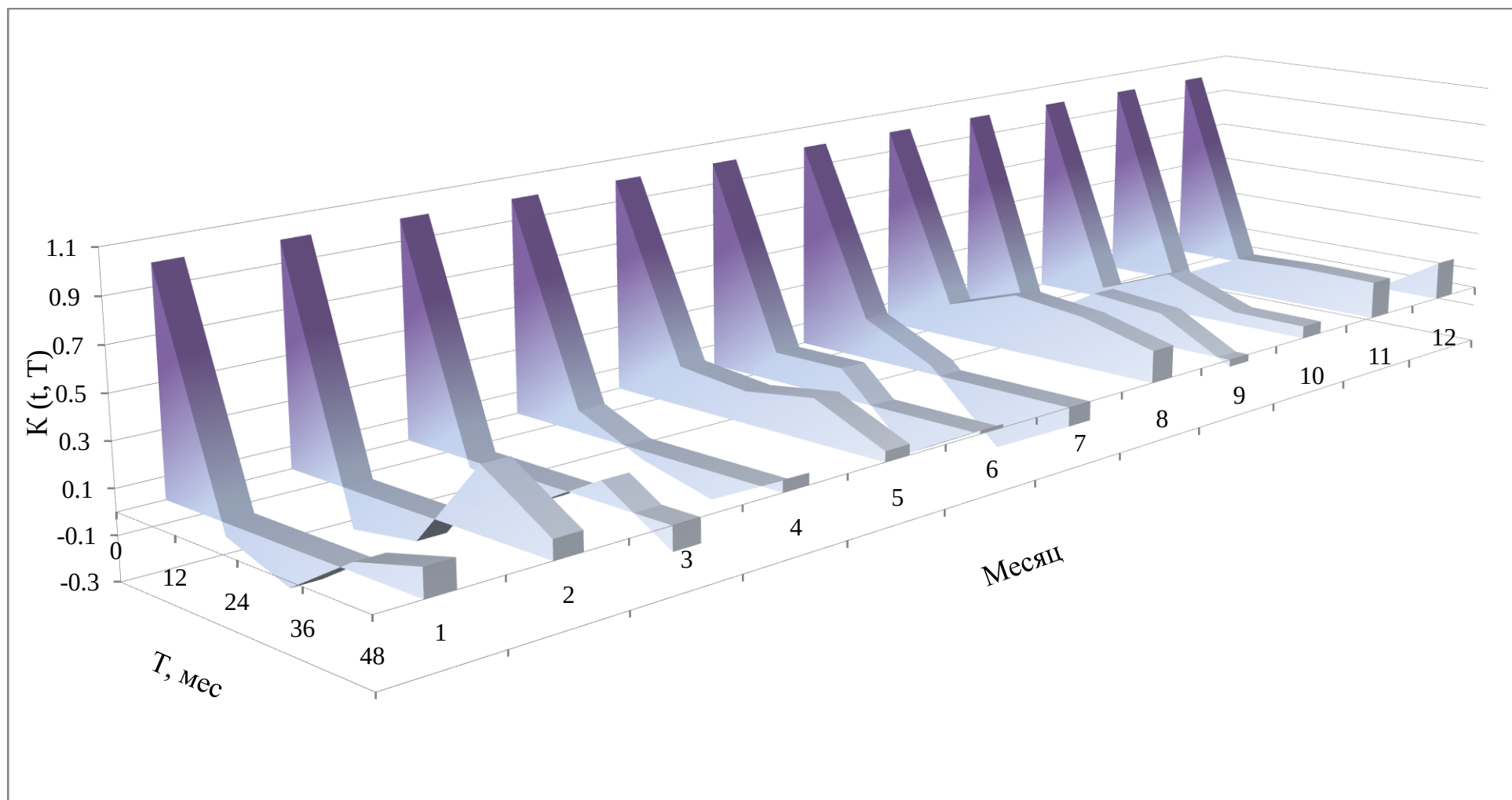


Рисунок 3.1.7— Графики оценок корреляционных функций ежегодных последовательностей значений солёности воды для всех месяцев года МГ-2 г. Северодвинск (с 1976 по 2012 гг)

Графики оценки корреляционных зависимостей межгодовой изменчивости $K(t, \tau)$, $\tau = 1$ год по станции о. Мудьюг (рисунки 3.1.5 – 3.1.7) достаточно быстро затухают на начальном участке. В июне корреляционные зависимости межгодовой изменчивости затухают медленно, а в мае не затухают, что свидетельствует о том, что в эти месяцы межгодовая изменчивость связана с преобладающим влиянием другого солеобразующего фактора.

Графики оценки корреляционных зависимостей по станции г. Северодвинск достаточно быстро затухают на начальном участке и продолжают флуктуировать с достаточно регулярными отклонениями от нулевого уровня в дальнейшем. Корреляционные зависимости межгодовой изменчивости солёности на станции Зимнегорский маяк повторяют ход аналогичных зависимостей для речного стока во время прохождения весеннего половодья и дождевых паводков, т.е. затухают на начальном участке и начинают флуктуировать с незначительными отклонениями в дальнейшем. Для остальных месяцев года с января по март и с июля по сентябрь, корреляционные зависимости межгодовой изменчивости не затухают, что свидетельствует о том, что в эти месяцы межгодовая изменчивость связана с преобладающим влиянием другого солеобразующего фактора.

Для того, чтобы понять причину, в качестве примера рассмотрим временную изменчивость ежегодных последовательностей значений солёности для этих месяцев годовых реализаций с фильтром Баттерворта по станции Зимнегорский маяк.

Выделение трендов фильтром Баттерворта

Результаты анализа рядов дают основание для выделения трендов – медленно меняющихся, гладких функций, под которыми наиболее часто понимается переменное математическое ожидание случайного процесса [5]. Для

того, чтобы сформулировать понятие тренда по отношению к процессу $\mu(t)$, в качестве модели воспользуемся выражением:

$$\mu(t) = M(t) + \mu^o(t),$$

где $M(t)$ – тренд; $\mu^o(t)$ – стационарный случайный процесс – отклонения от тренда. Основанием для записи модели служит проявление на временных отрезках определенных тенденций к увеличению или уменьшению значений процесса, а также возможность определения факторов, формирующих то или иное изменение. Выделяются периоды локальной по отношению к математическому ожиданию нестационарности процесса $\mu^o(t)$. Одним из методов анализа временных рядов с целью выделения тенденций или трендов на повышение или понижение значений является их фильтрация, которая бывает низкочастотной и высокочастотной, полосовой и режекторной.

Более отчетливо периоды локальной нестационарности процесса прослеживаются по результатам низкочастотной фильтрации Баттерворта с частотой среза $\omega = 0.57$ рад/год.

Низкочастотная фильтрация – преобразование ряда, при котором исключаются высокочастотные составляющие.

Для анализа многолетней изменчивости гидрометеорологических процессов рекомендуется применять цифровую тангенсную низкочастотную фильтрацию рядов. Тангенсная фильтрация обладает такими преимуществами, как простота вычисления коэффициентов передаточной функции фильтра и большая крутизна амплитудно-частотной характеристики вблизи частоты среза.

Одна из характеристик – передаточная функция фильтра $H(\omega)$.

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \frac{\sum_{k=0}^K \beta_k Z^{-k}}{1 + \sum_{l=1}^L \alpha_l Z^{-1}}, (3.1.1)$$

где $H(\omega)$ – передаточная функция;

$X(\omega)$ и $Y(\omega)$ – их Фурье – изображение;

β_k, α_l – действительные числа, коэффициенты фильтра;

$Z = \exp(i\omega\Delta)$;

Δ – интервал дискретизации рядов $\{x_i\}$ и $\{y_i\}$.

Передаточная функция фильтра $H(\omega)$ выражает связь между частотными представлениями рядов $\{x_i\}$ и $\{y_i\}$ и имеет значения в комплексной области, т.е. $H(\omega)$ можно представить в виде:

$$H(\omega) = |H(\omega)| \exp(-i\varphi(\omega)), \quad (3.1.2)$$

$$H(\omega) = \frac{(b_0 + b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2})^{M_1}}{\prod_{m=1}^{M_1} (1 + a_{1m} Z^{-1} + a_{2m} Z^{-2})}, \quad (3.1.3)$$

где $H(\omega)$ – передаточная функция ;

$b_0, b_1, b_2, a_{1m}, a_{2m}$ – коэффициенты.

Величина $M = 2M_1$ – порядок передаточной функции или порядок фильтра.

При таком представлении функцию $|H(\omega)|$ называют амплитудно-частотной характеристикой фильтра. В каждой точке частотного диапазона она выражает отношение амплитуд гармоник отфильтрованного и неотфильтрованного ряда с данной частотой. Функцию $\varphi(\omega)$ называют фазово-частотной характеристикой фильтра, выражающей зависимость сдвига фаз от частоты в отфильтрованном и неотфильтрованном рядах.

Тангенсные цифровые фильтры Баттерворта имеют передаточную функцию вида (3.1.3), что позволяет применить вышеуказанный метод фильтрации, обладающий рекуррентным способом вычисления отфильтрованного ряда и возможность повышения порядка фильтра увеличением числа уравнений.

Тангенсный низкочастотный фильтр Баттерворта порядка M имеет амплитудно-частотную характеристику:

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\omega\Delta}{2}\right)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\omega_c\Delta}{2}\right)} \right]^{2M}}}, \quad (3.1.4)$$

где ω – частота среза.

Результаты низкочастотной фильтрации значений солёности станции Зимнегорский маяк представлены на рисунках 3.1.7 – 3.1.15.

На рисунках реализаций видно наличие трендов или периодов локальной нестационарности, которые и приводят к увеличению коррелированности процессов в эти месяцы. Например, в январе 1985 года средний уровень солёности составлял 24.8 ‰ в конце периода 22.0 ‰. Значение солёности понизилось на 2.8 ‰. За десятилетие в среднем на 1.4 ‰. С февраля 1985 года за исследуемый период солёность понизилась на 4.2‰. Для других анализируемых месяцев наблюдается тенденция на увеличение солёности за первое десятилетие рассматриваемого периода в среднем на 1.7 ‰ и понижение в следующие 10 лет 1.6 ‰. Наличие тренда возможно связано с влиянием какого-то другого солеформирующего фактора.

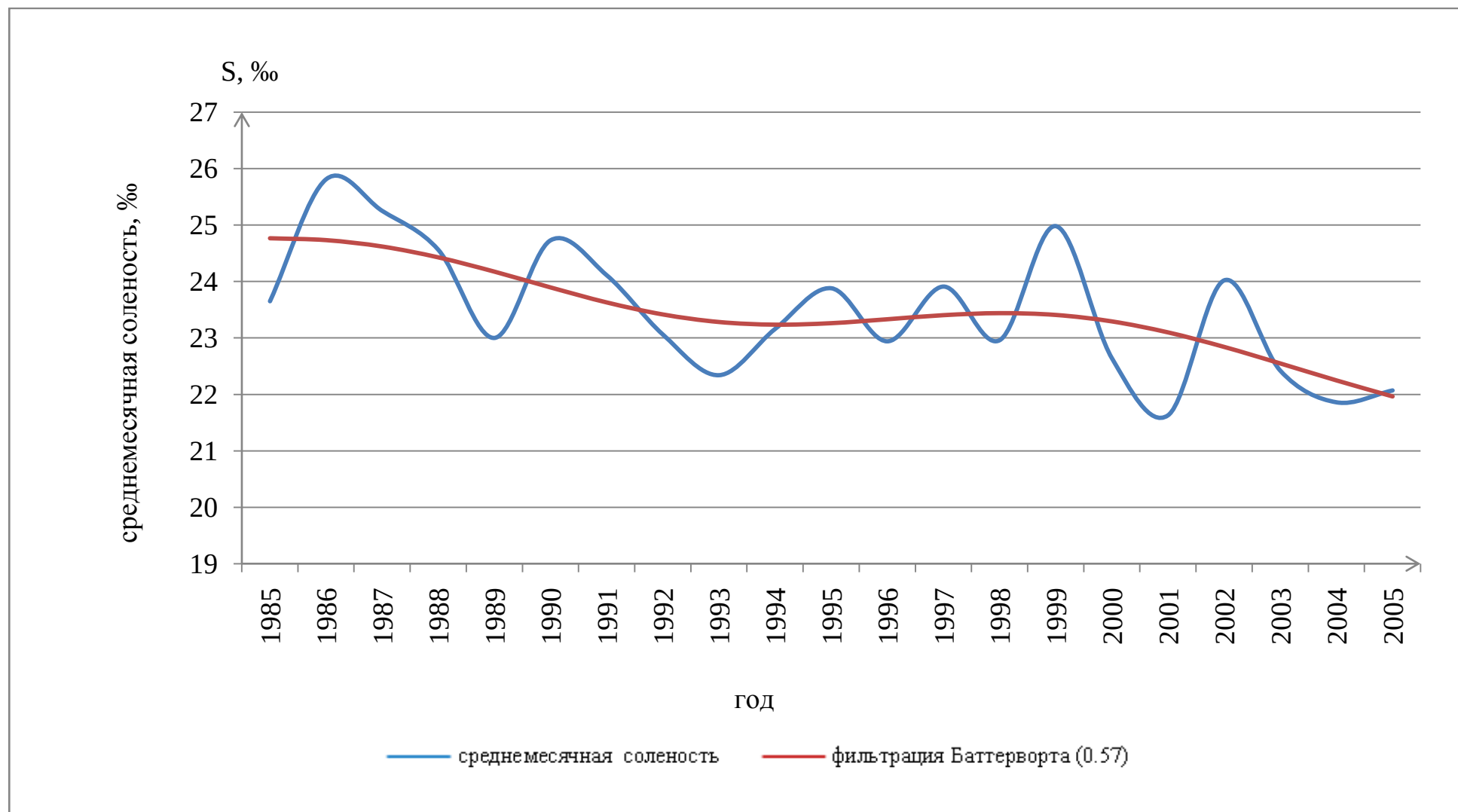


Рисунок 3.1.8 — Реализация среднемесячных значений солености за январь МГ-2 Зимнегорский маяк

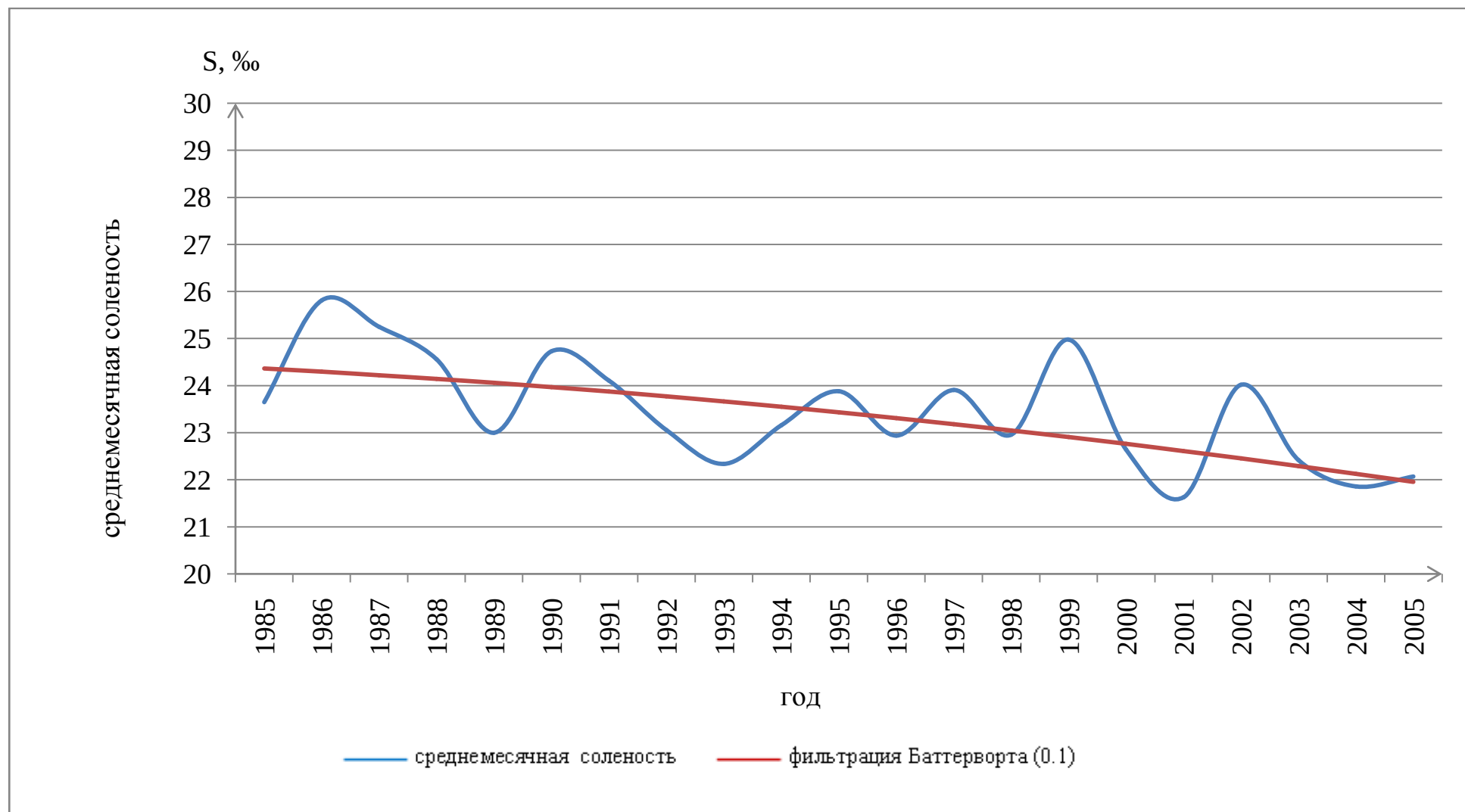


Рисунок 3.1.9 — Реализация среднемесячных значений солёности за январь МГ-2 Зимнегорский маяк

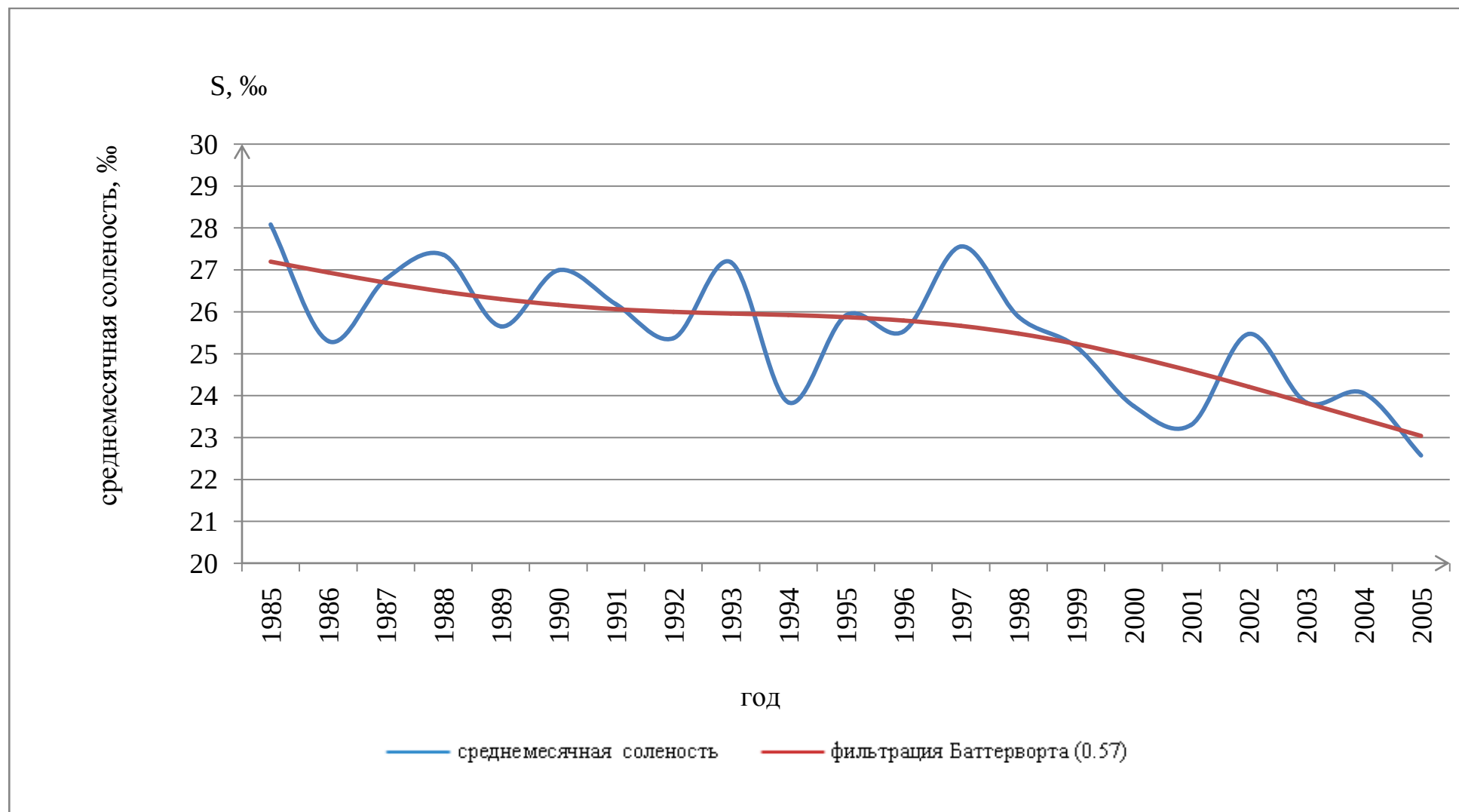


Рисунок 3.1.10 — Реализация среднемесячных значений солености за февраль МГ-2 Зимнегорский маяк

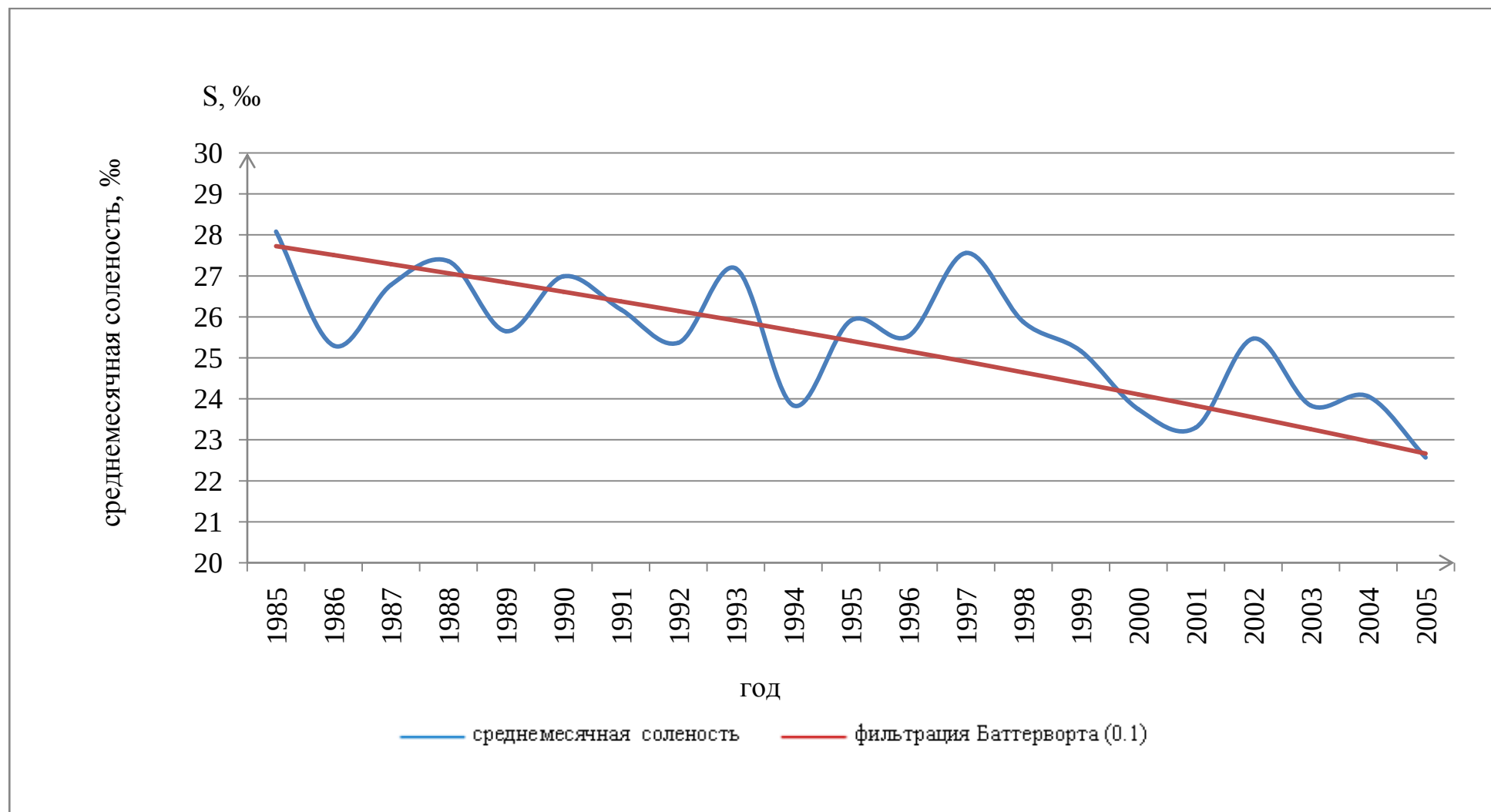


Рисунок 3.1.11 — Реализация среднемесячных значений солёности за февраль МГ-2 Зимнегорский маяк

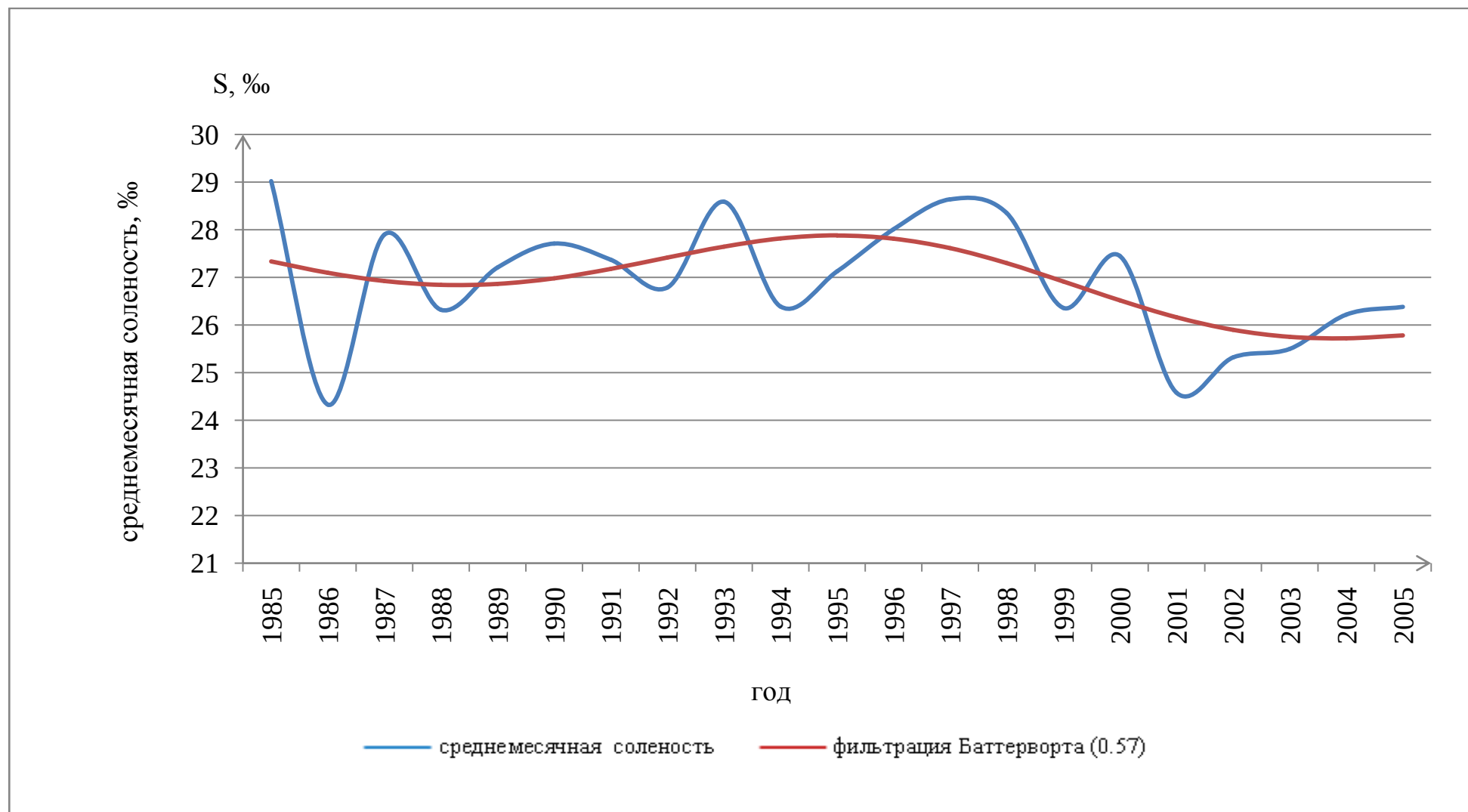


Рисунок 3.1.12 — Реализация среднемесячных значений солености за март МГ-2 Зимнегорский маяк

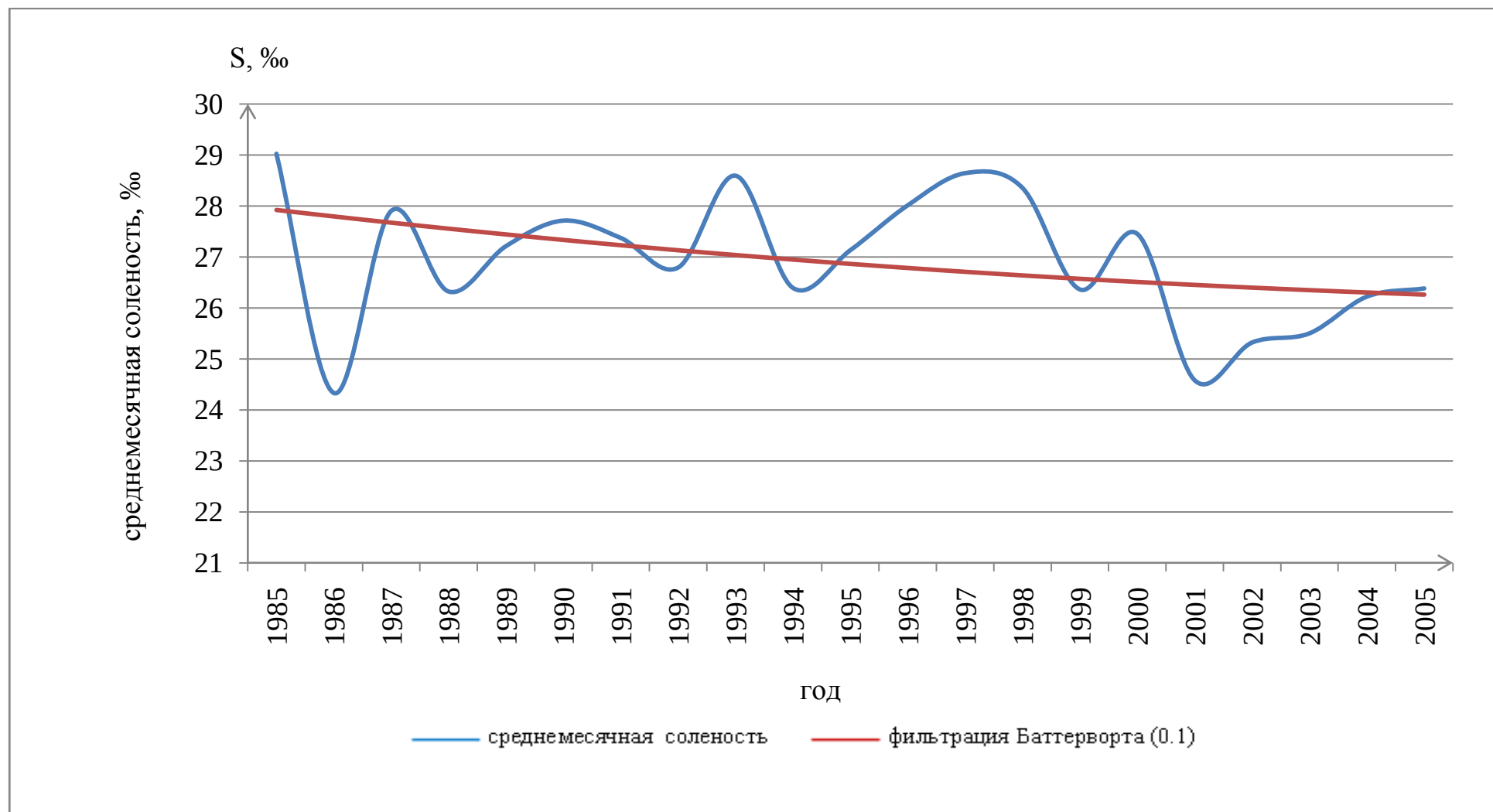


Рисунок 3.1.13 — Реализация среднемесячных значений солености за март МГ-2 Зимнегорский маяк

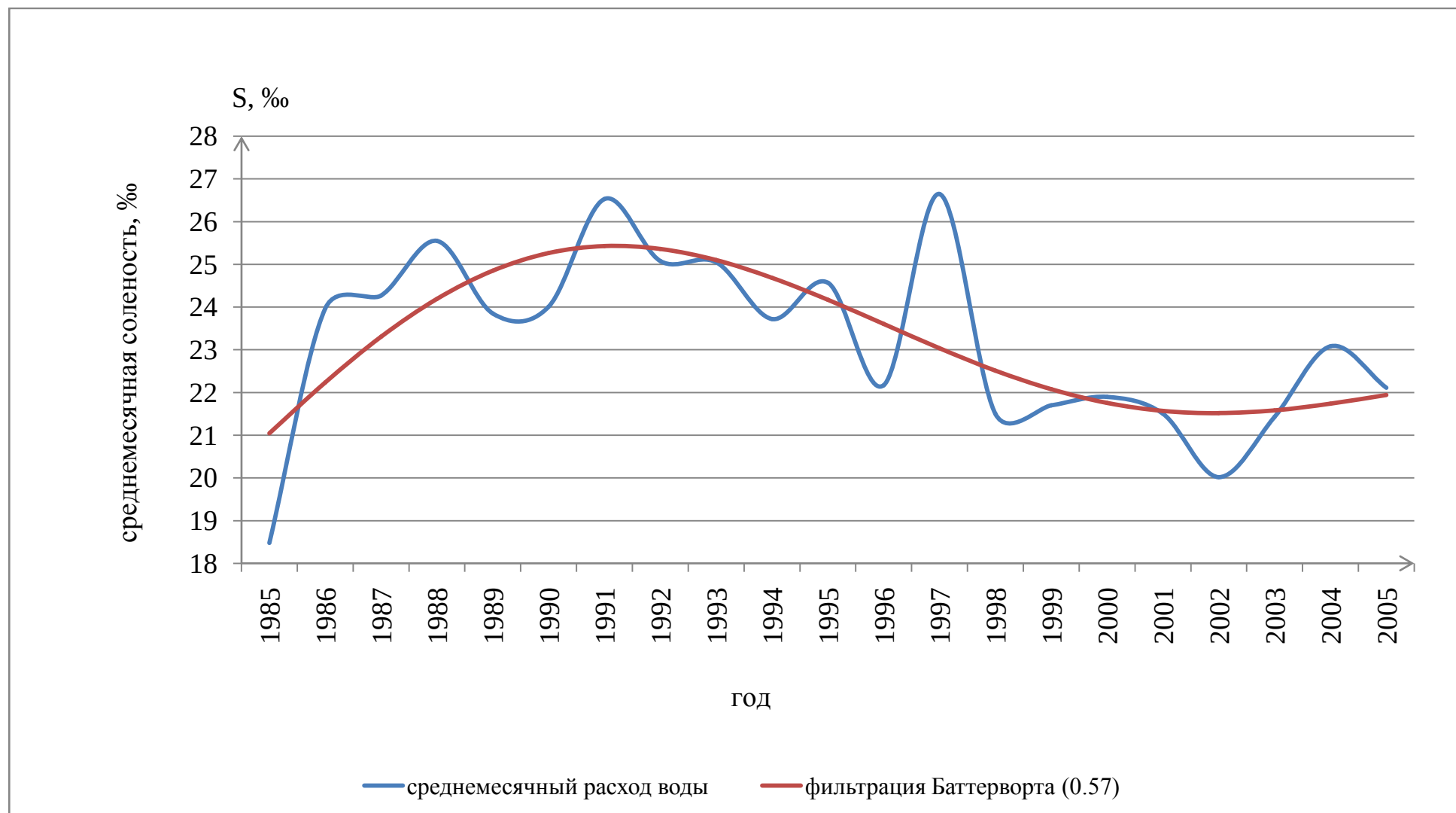


Рисунок 3.1.14 — Реализация среднемесячных значений солености за июль МГ-2 Зимнегорский маяк

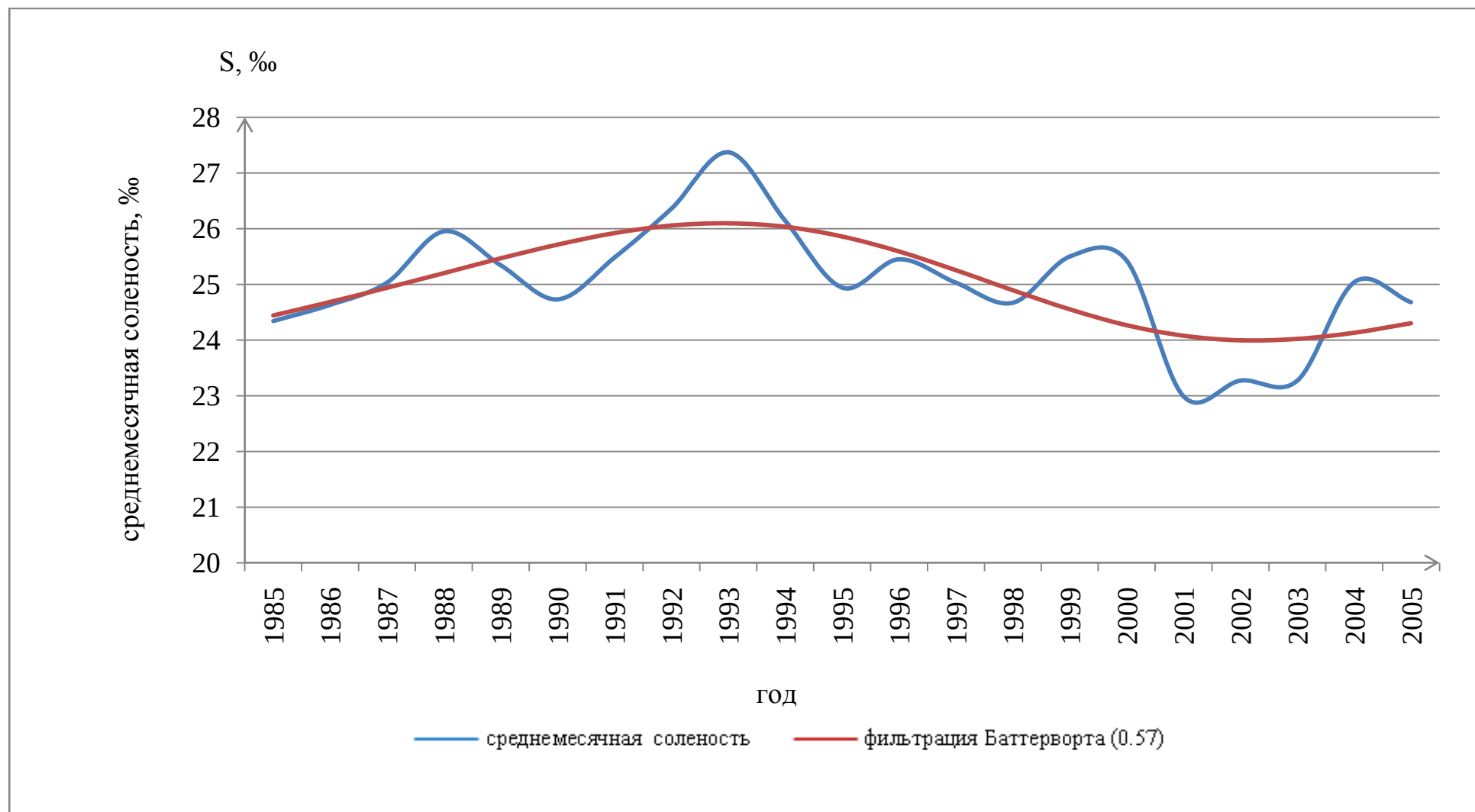


Рисунок 3.1.15 — Реализация среднемесячных значений солености за август МГ-2 Зимнегорский маяк

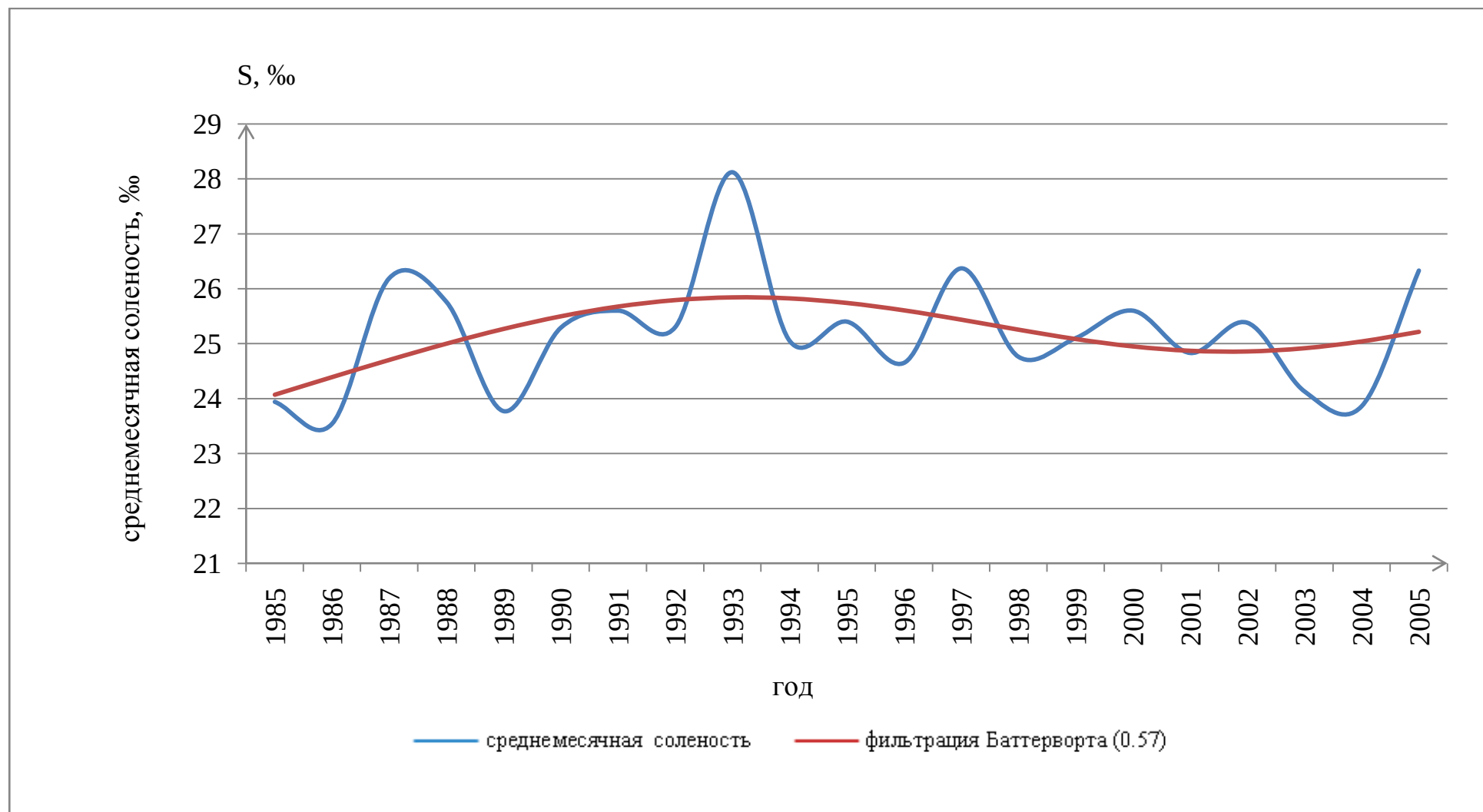


Рисунок 3.1.16 — Реализация среднемесячных значений солености за сентябрь МГ-2 Зимнегорский маяк

3.2 Внутригодовая изменчивость солености

Сезонные миграции зоны смешения вод зависят от внутригодового распределения стока.

Можно выделить несколько характерных периодов: зимний с повышенной соленостью; весенний с экстремально низкой соленостью; летний с повышенной соленостью; осенний с пониженной соленостью. Во внутригодовом ходе солености ее минимум связан с весенним половодьем, когда расход воды возрастает в 10 – 20 раз по сравнению с меженными.

На подъеме половодья зона смешения перемещается в сторону моря, а на спаде – к морскому краю дельты. Речная вода, поступающая из реки Северная Двина в Двинский залив, сохраняет поток до станции Зимнегорский маяк и далее входит в горло моря, занимая половину пролива и прижимаясь к восточному берегу. При переходе к летней межени (июнь, июль) зона смешения наблюдается у морского края дельты и проникает в устья рукавов. Максимальная соленость в период летней межени наступает в августе – сентябре. Затем соленость воды под влиянием осеннего паводка (в октябре) несколько снижается. В ноябре – декабре соленость вновь возрастает и достигает абсолютного максимума в декабре. Далее, несмотря на продолжающееся до марта – начала апреля уменьшение стока речной воды, соленость в верхнем слое уменьшается. Это связано с влиянием припайного льда на устьевом взморье, который снижает растекание речных вод и формирует подледный распресненный слой воды, а также экранирует воздействие ветра на процесс перемешивания.

Анализ реализации солености по станции о. Мудьюг показывает наличие лет с повышенной соленостью и пониженной.

Для предварительной оценки существования связи между рядами расходов и солености выполним разведочный анализ в виде взаимного

квантильного анализа данных (рисунок 3.2.2– 3.2.4). На рисунках вертикальными линиями обозначены квантили среднемесячных расходов воды реки Северная Двина с. Усть-Пинега, горизонтальными – квантильный анализ значений солености в пределах выделенных областей расходов воды. В общем облаке точек видна некоторая закономерность: областям максимальных значений стока соответствуют области минимальных значений солености, областям минимальных – области максимальных значений. Хотя существуют отскакивающие точки, что может говорить о том, что речной сток является не единственным фактором, формирующим режим солености. Учитывая это можно говорить, что связь между среднемесячными величинами речного стока и солености существует.

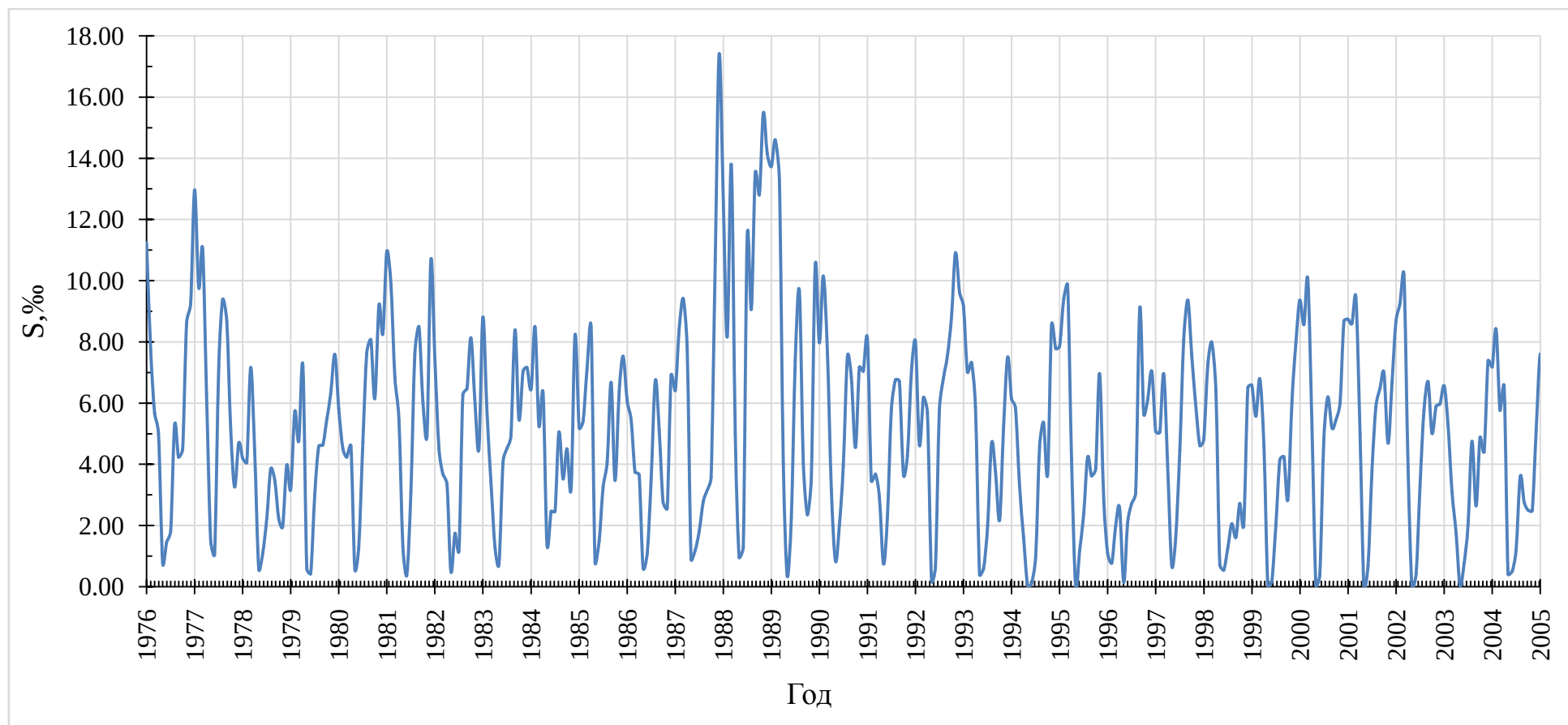


Рисунок 3.2.1 — Реализация среднемесячных значений солёности по станции о. Мудьюг

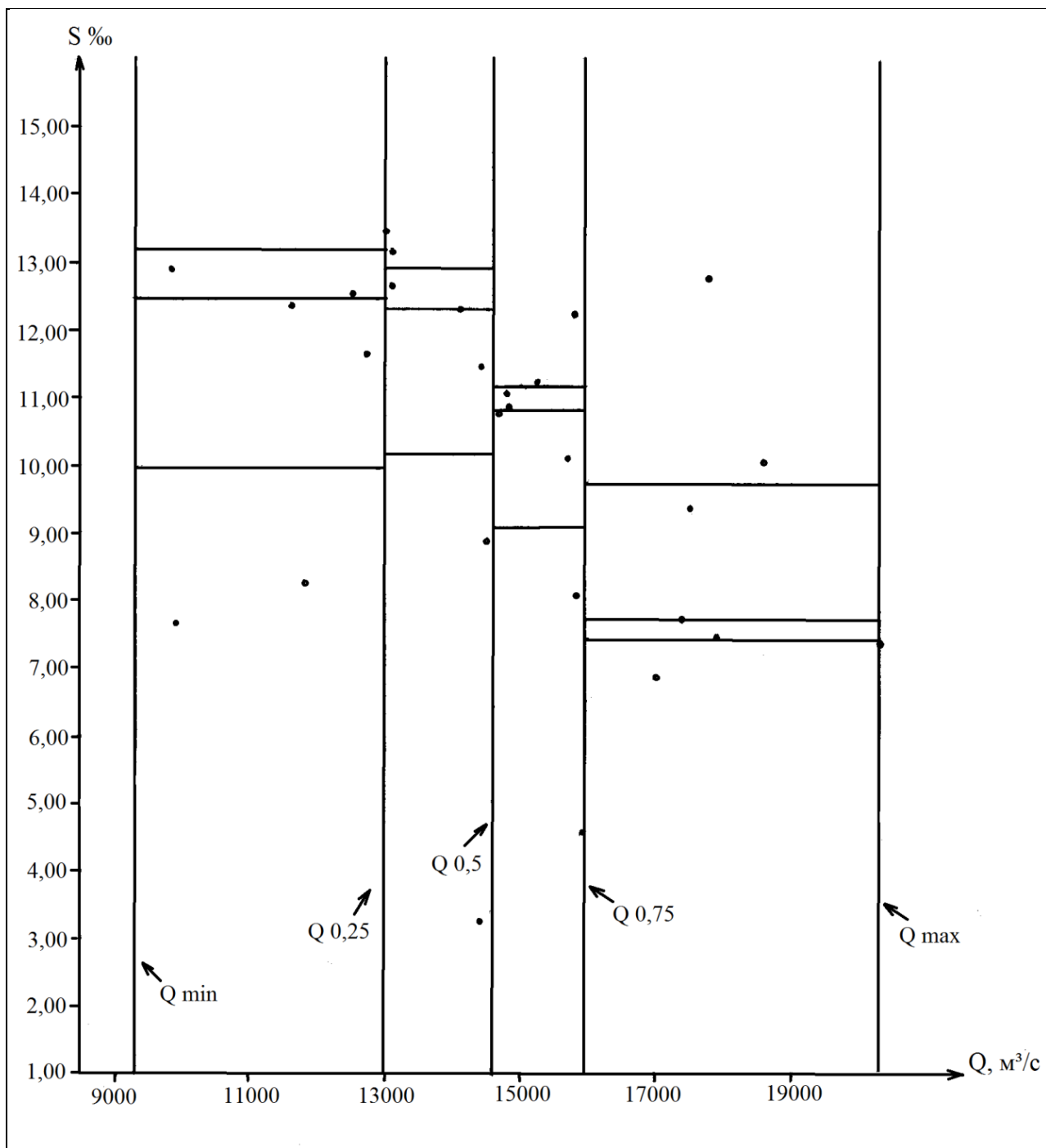


Рисунок 3.2.2 — Квантильный анализ среднемесячных значений солёности за май (с 1976 по 2012 гг.) по станции г. Северодвинск

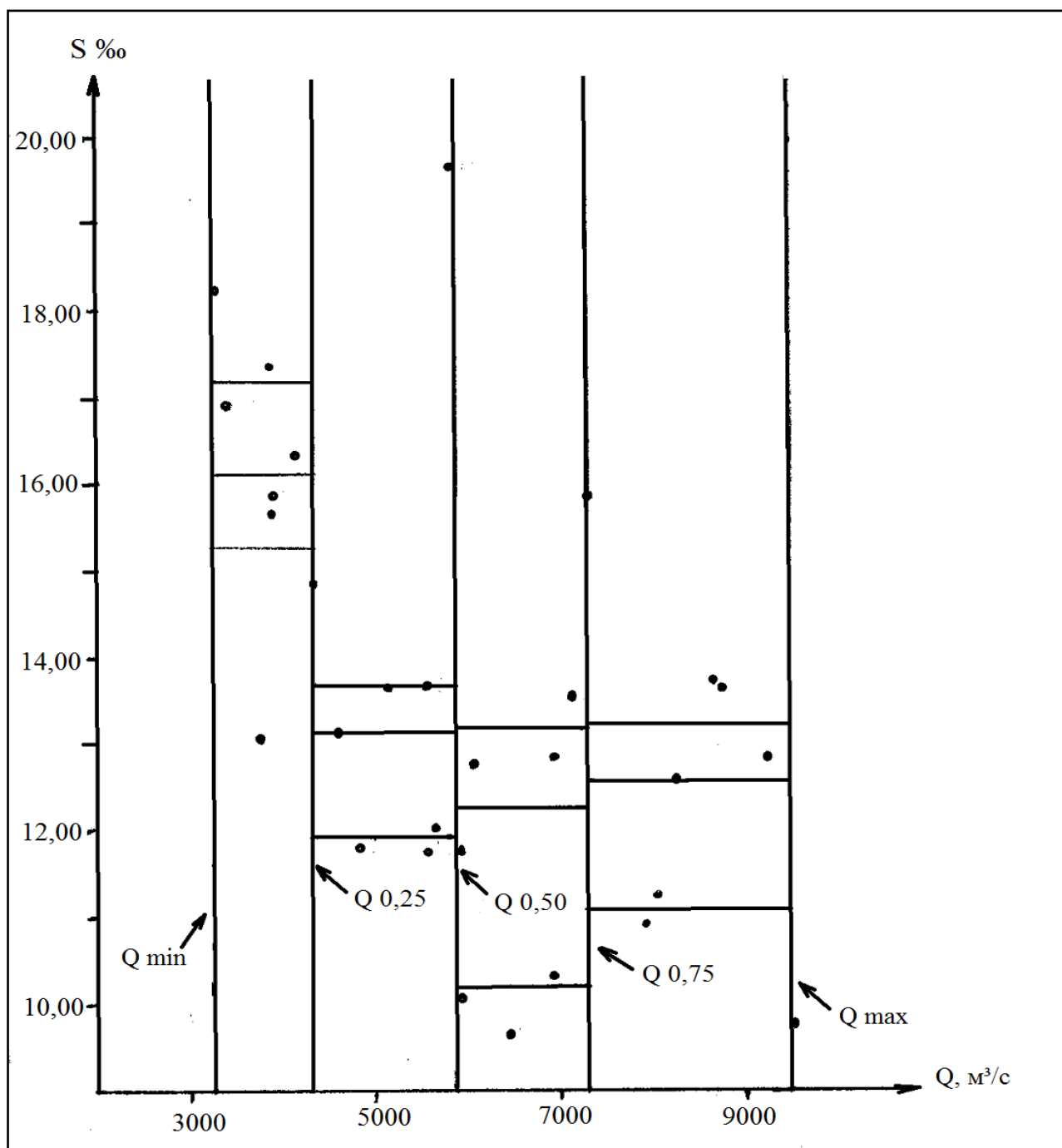


Рисунок 3.2.3 — Квантильный анализ средних месячных значений солености за июнь (с 1976 по 2012 гг.) по станции г. Северодвинск

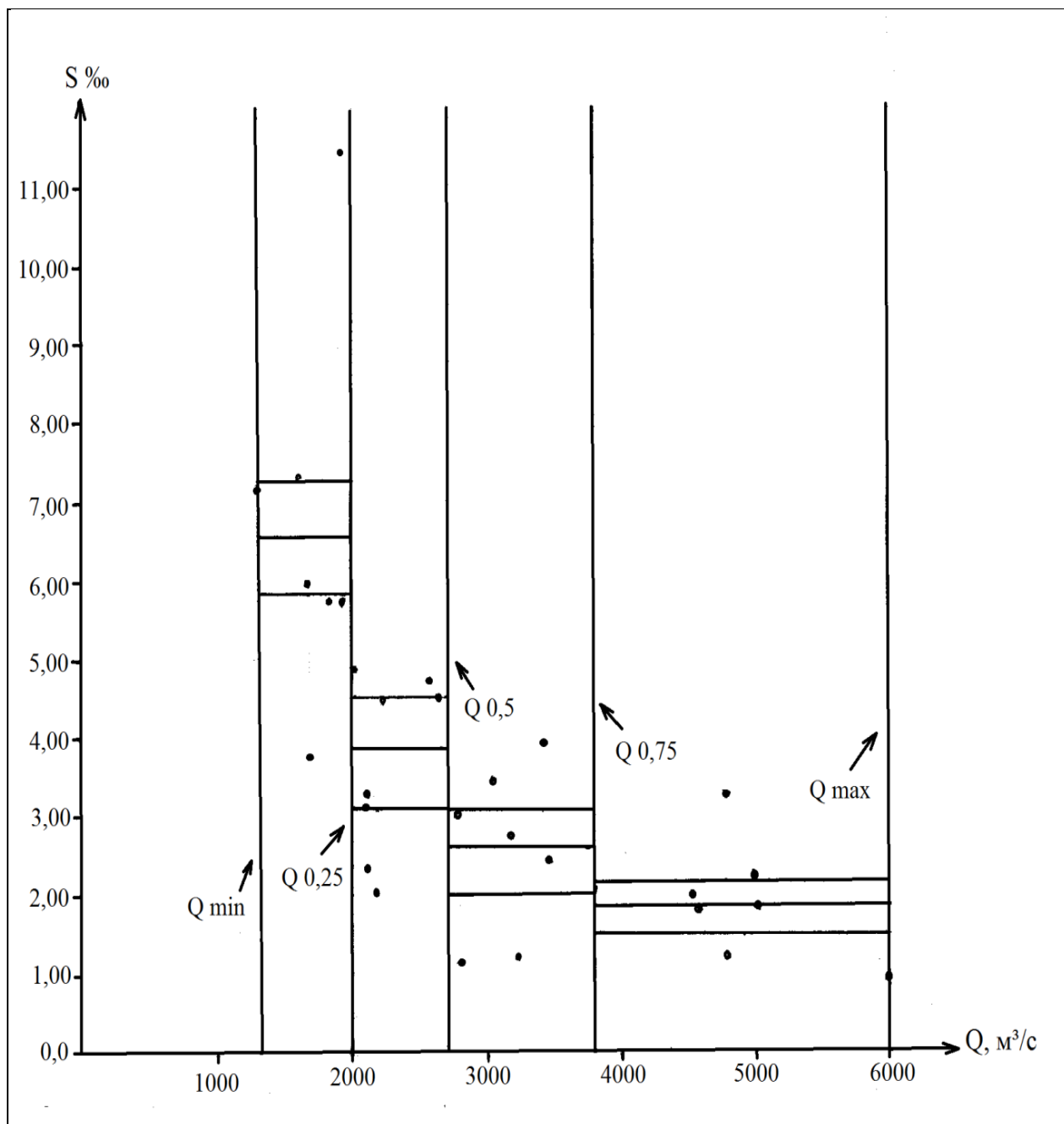


Рисунок 3.2.4 — Квантильный анализ среднемесячных значений солености за июль (с 1976 по 2005 гг.) по станции о. Мудьюг

Интерес к изучению зоны смешения морских и речных вод связан с практической потребностью прогнозирования проникновения соленых вод в места расположения водозаборов. В связи с этим проводятся наблюдения в форме регулярных и эпизодических съемок распределения солености в устьевой области реки.

Режим солености воды в устьевой области реки Северная Двина находится под доминирующим влиянием стока пресных вод, в чем можно убедиться, рассмотрев временную изменчивость стока реки и его совместный анализ с соленостью воды на единой методологической основе в диапазонах внутригодовой и многолетней изменчивости.

В качестве исходной информации для анализа внутригодового колебания солености, в настоящей работе использованы среднемесячные значения солености воды по МГ-2 о. Мудьюг, МГ-2 г. Северодвинск, МГ-2 Зимнегорский маяк.

Расчет вероятностных характеристик внутригодовой изменчивости значений солености для каждого месяца года приведен в приложении Л. Ординаты автокорреляционной функции среднемесячных значений солености воды представлены в приложении М.

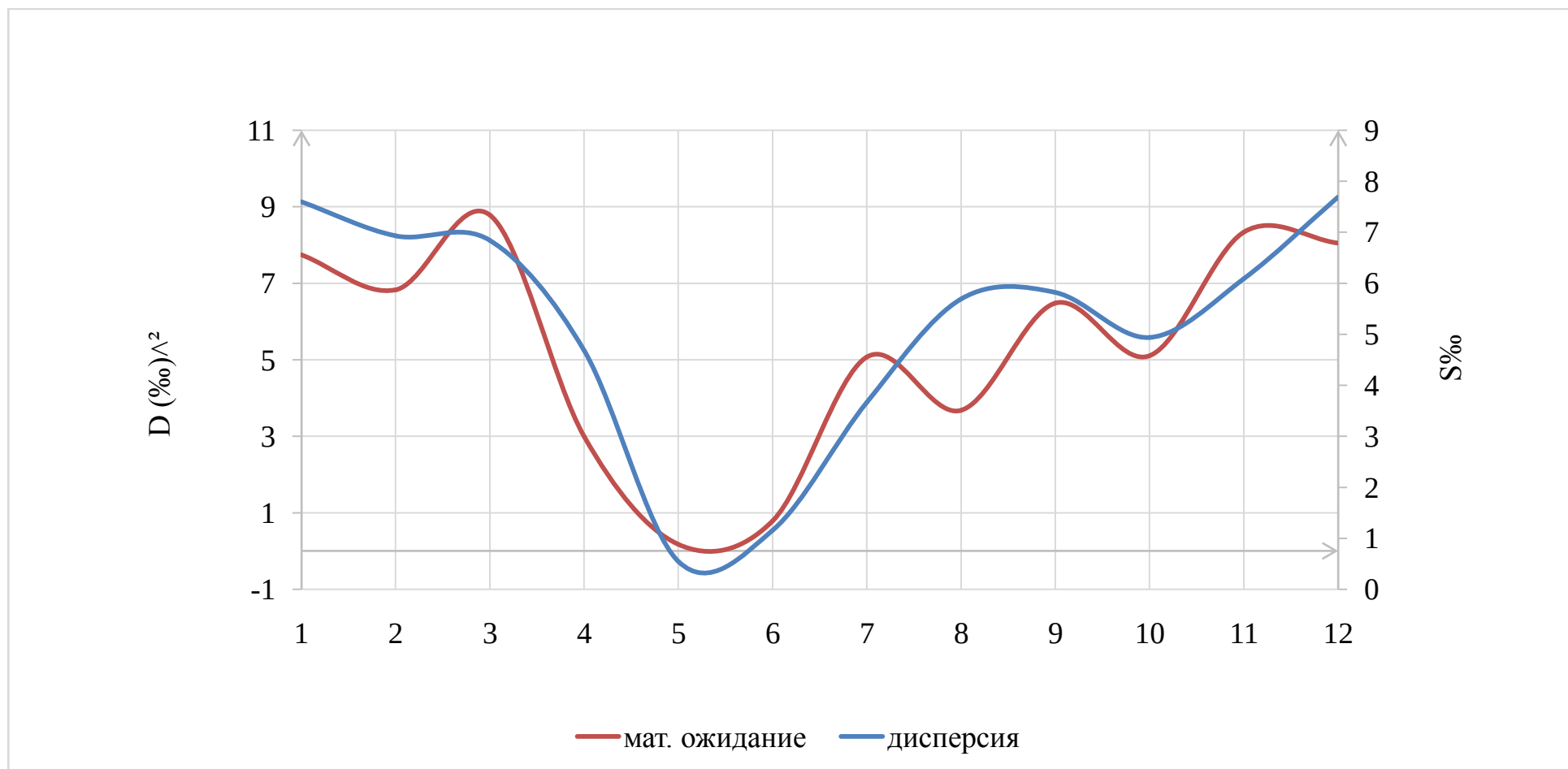


Рисунок 3.2.5 Оценка математического ожидания и дисперсии ряда среднемесячных значений солености воды. Мудьюг (с 1976 по 2005 гг)

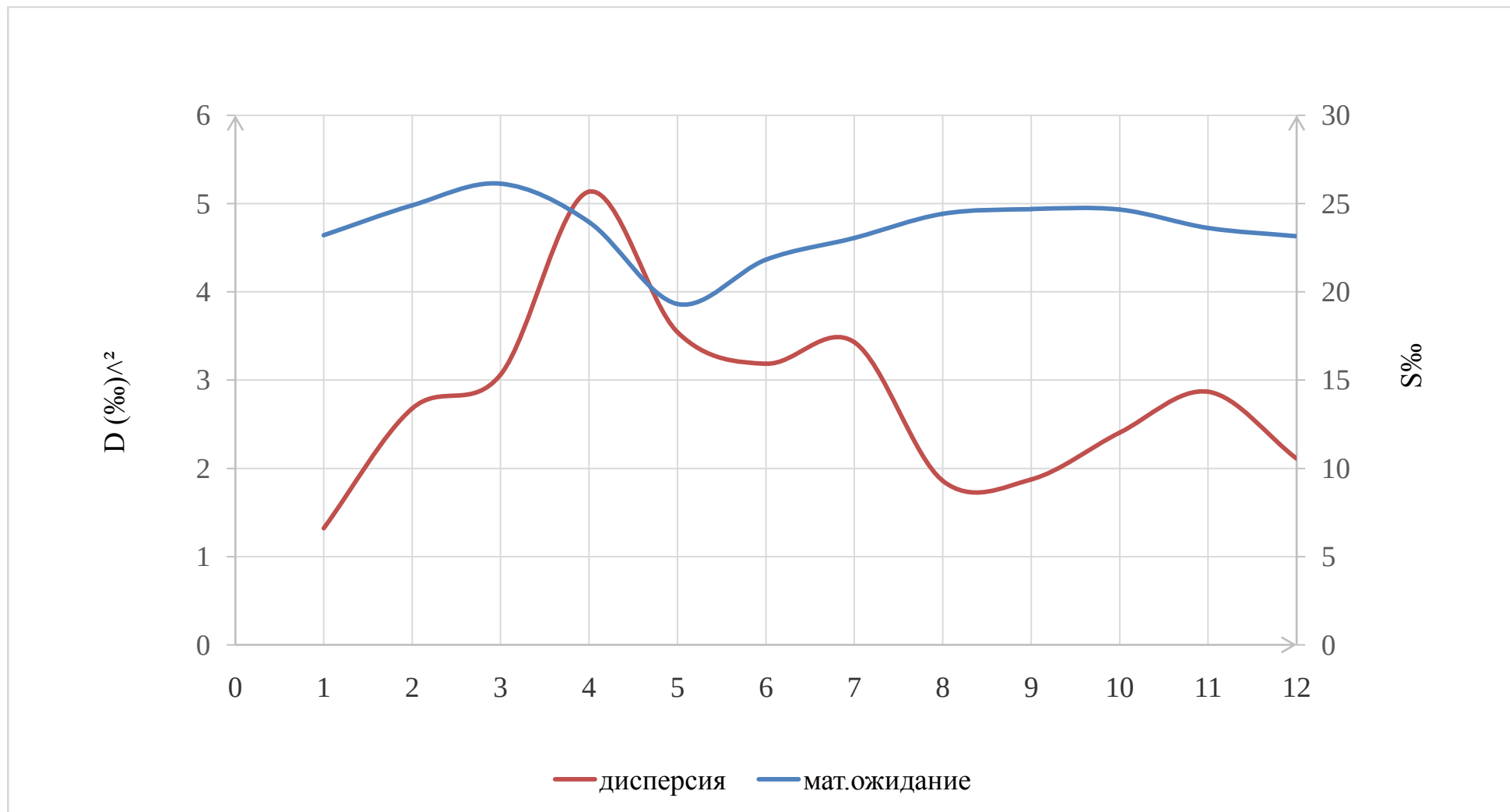


Рисунок 3.2.6 Оценка математического ожидания и дисперсии ряда среднемесячных значений солёности воды МГ-23 Зимнегорский маяк (с 1985 по 2005 гг)

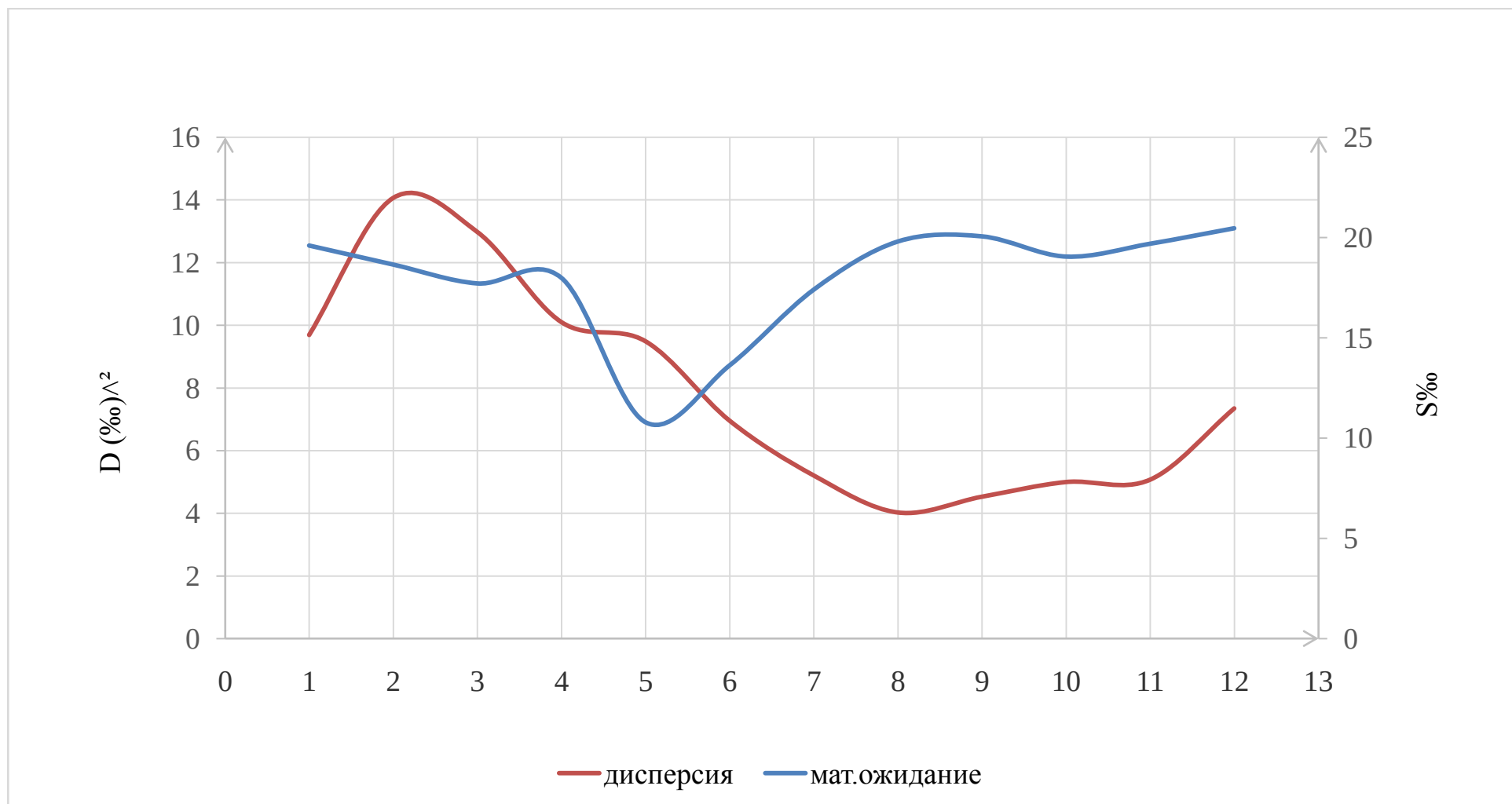


Рисунок 3.2.7 Оценка математического ожидания и дисперсии ряда среднемесячных значений солёности воды МГ-2 г. Северодвинск (с 1976 по 2012 гг.)

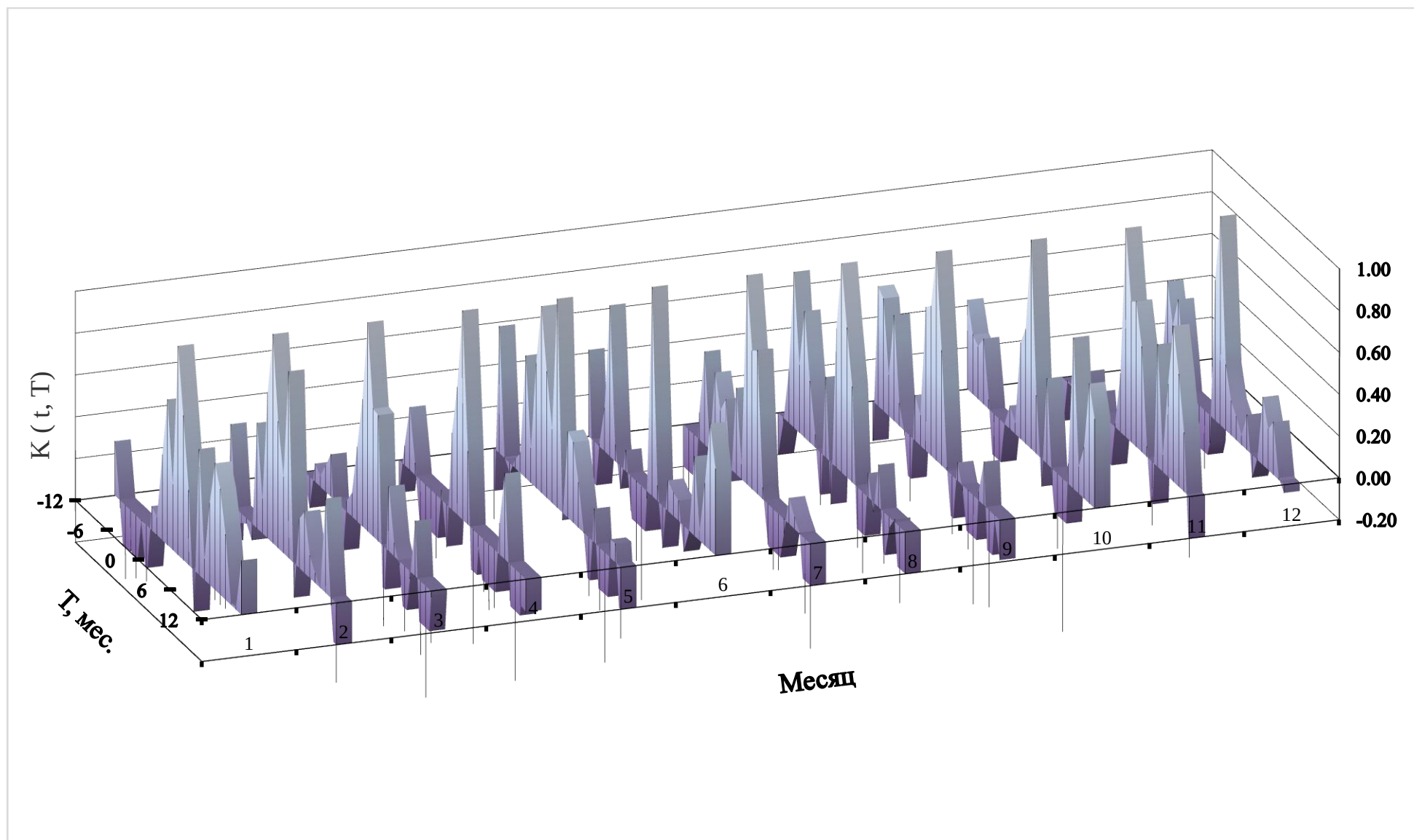


Рисунок 3.2.8 — Графики автокорреляционной функции среднемесячны значений солёности воды МГ-2 о. Мудьюг

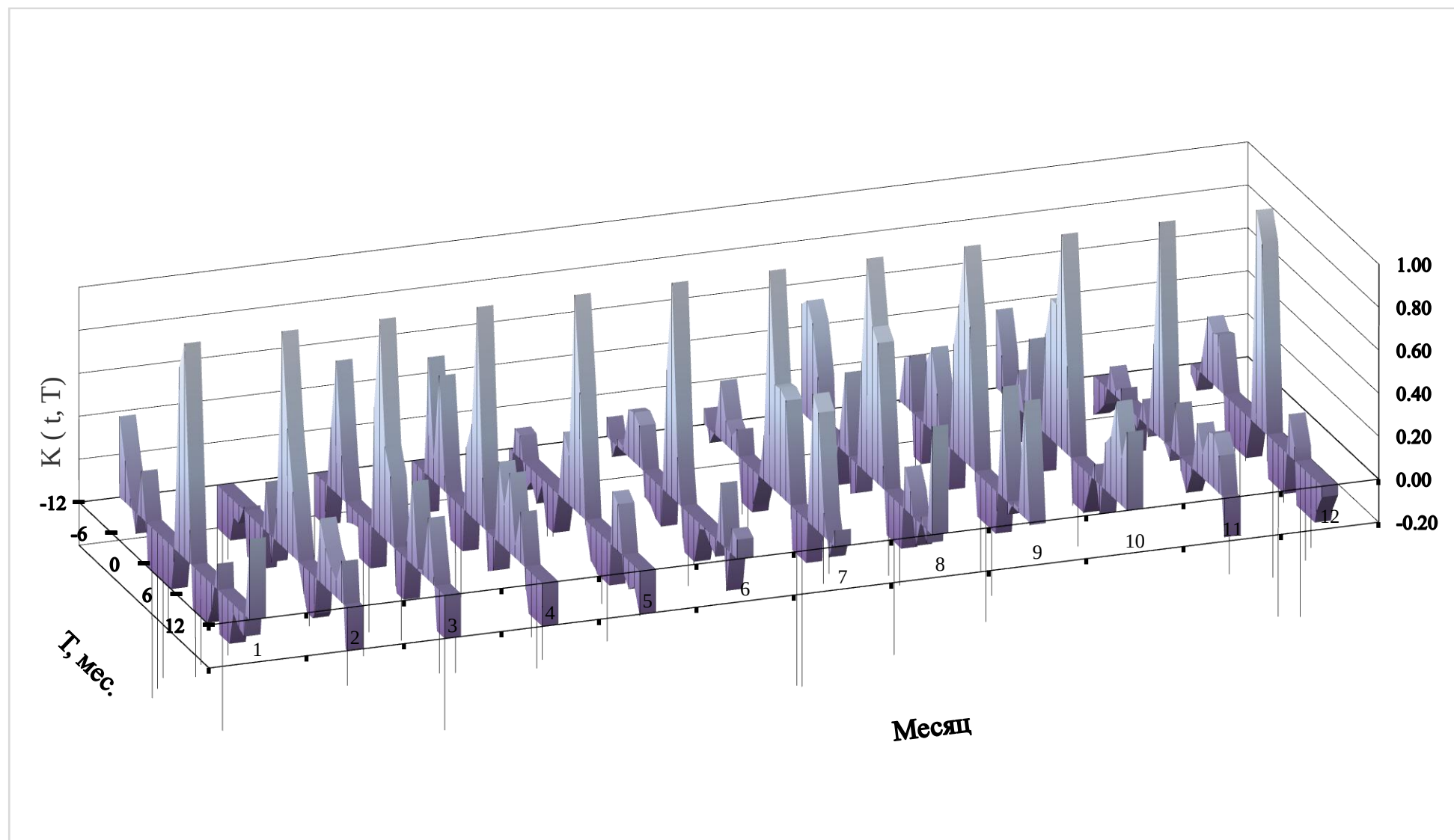


Рисунок 3.2.9 — Графики автокорреляционной функции среднемесячны значений солёности воды МГ-2 Зимнегорский маяк

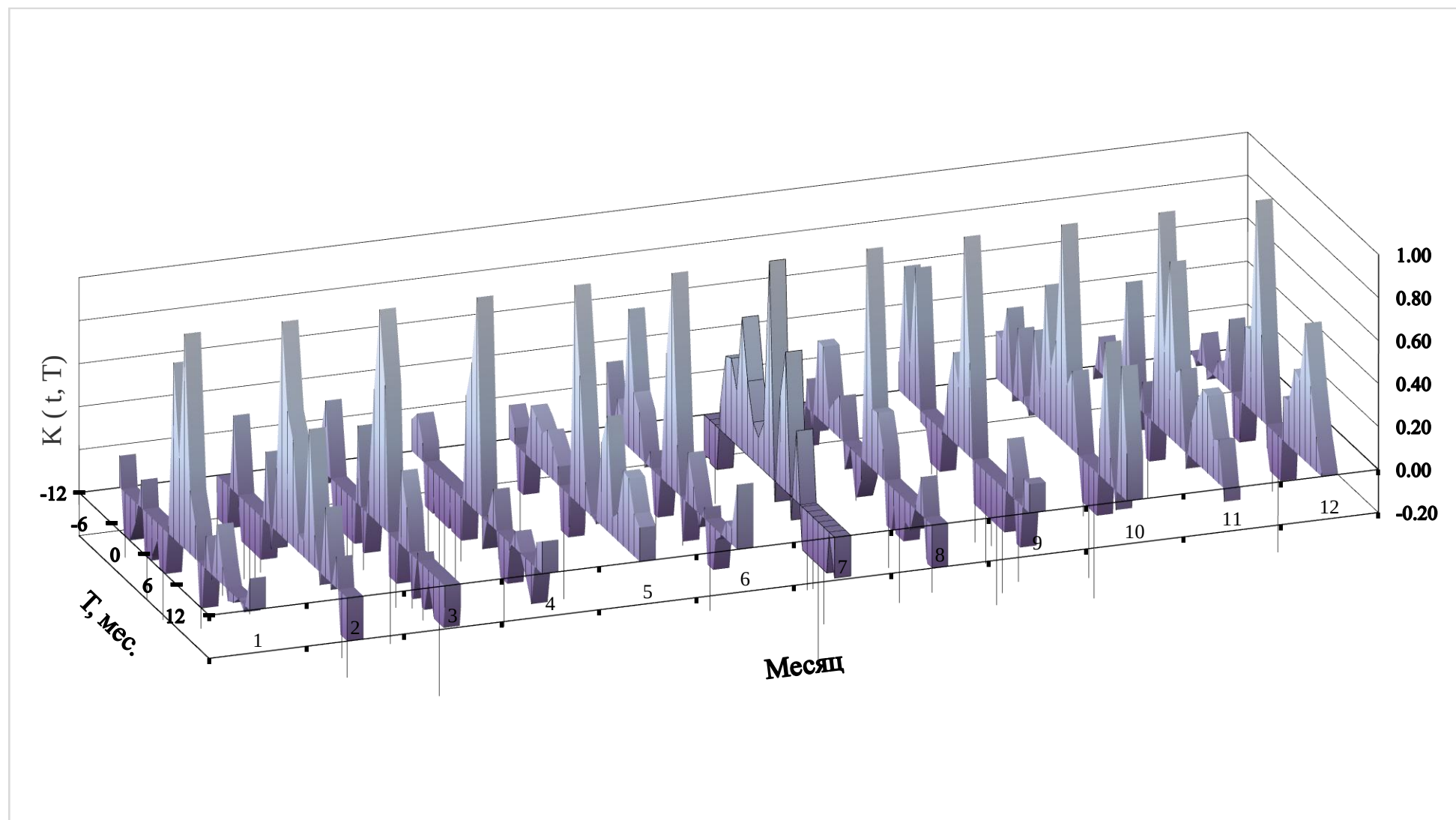


Рисунок 3.2.10 — Графики автокорреляционной функции среднемесячны значений солёности МГ-2 г. Северодвинск

На графике оценки математического ожидания $m(t)$ солёности станции о. Мудьюг (рисунок 3.2.5) наблюдается один основной минимум в мае, связанный с прохождением волны половодья, и один вторичный минимум в октябре, связанный с выпадением осенних осадков.

График оценки дисперсии $D(t)$ повторяет основной минимум математического ожидания, но при этом наблюдаются три вторичных минимума в феврале, августе и октябре, которые практически повторяют минимумы на кривой оценки математического ожидания.

Когерентный ход графиков оценок $m(t)$ и $D(t)$ свидетельствуют о том, что межгодовая изменчивость солёности также как и речного стока проявляется в виде амплитудной модуляции основных элементов внутригодового хода.

Основной минимум солёности на графике оценки математического ожидания по двум другим станциям (рисунок 3.2.6, 3.2.7) приходится на май, что также связано с прохождением волны половодья. По станции Зимнегорский маяк это единственный минимум, по Северодвинску наблюдаются вторичные минимумы, приходящиеся на октябрь и май. Минимум в октябре по-видимому связан с выпадением осадков, в мае возможно связан с ледотаянием. На графиках оценка дисперсии $D(t)$ практически зеркально отражает ход оценки $m(t)$, но с некоторым сдвигом во времени, что говорит о влиянии на солёность других солеформирующих факторов.

Графики оценок корреляционных зависимостей внутригодовой изменчивости $K(t, \tau)$, $\tau=1$ месяц также как и у речного стока быстро затухают на начальном участке и продолжают флуктуировать с незначительными отклонениями от нулевого уровня в дальнейшем (рисунок 3.2.8 –3.2.10).

4 Влияния речного стока на режим солености в диапазоне внутригодового хода и многолетней изменчивости

В условиях существенного влияния речного стока на соленость вод устьевой области реки Северная Двина возникает необходимость в получении его количественных оценок и установления вида взаимосвязи.

На рисунке 4.1 приведены графики оценки математического ожидания внутригодового хода солености на анализируемых станциях за рассматриваемый период. Прямыми линиями обозначены средние многолетние значения.

Как видно из рисунка, на всех станциях, основной минимум наблюдается в мае. При этом форма графиков оценки $m(t)$ на станциях Мудьюг и г. Северодвинск практически совпадают. Различие состоит лишь в разном уровне среднемноголетнего значения, что связано с большим влиянием, беломорских вод у г. Северодвинска. На графике оценки $m(t)$ Зимнегорский маяк обращает на себя внимание вторичный минимум зимой, что может быть связано с непромерзающим источником пресной воды ручья Каменный, который распресняет морские воды.

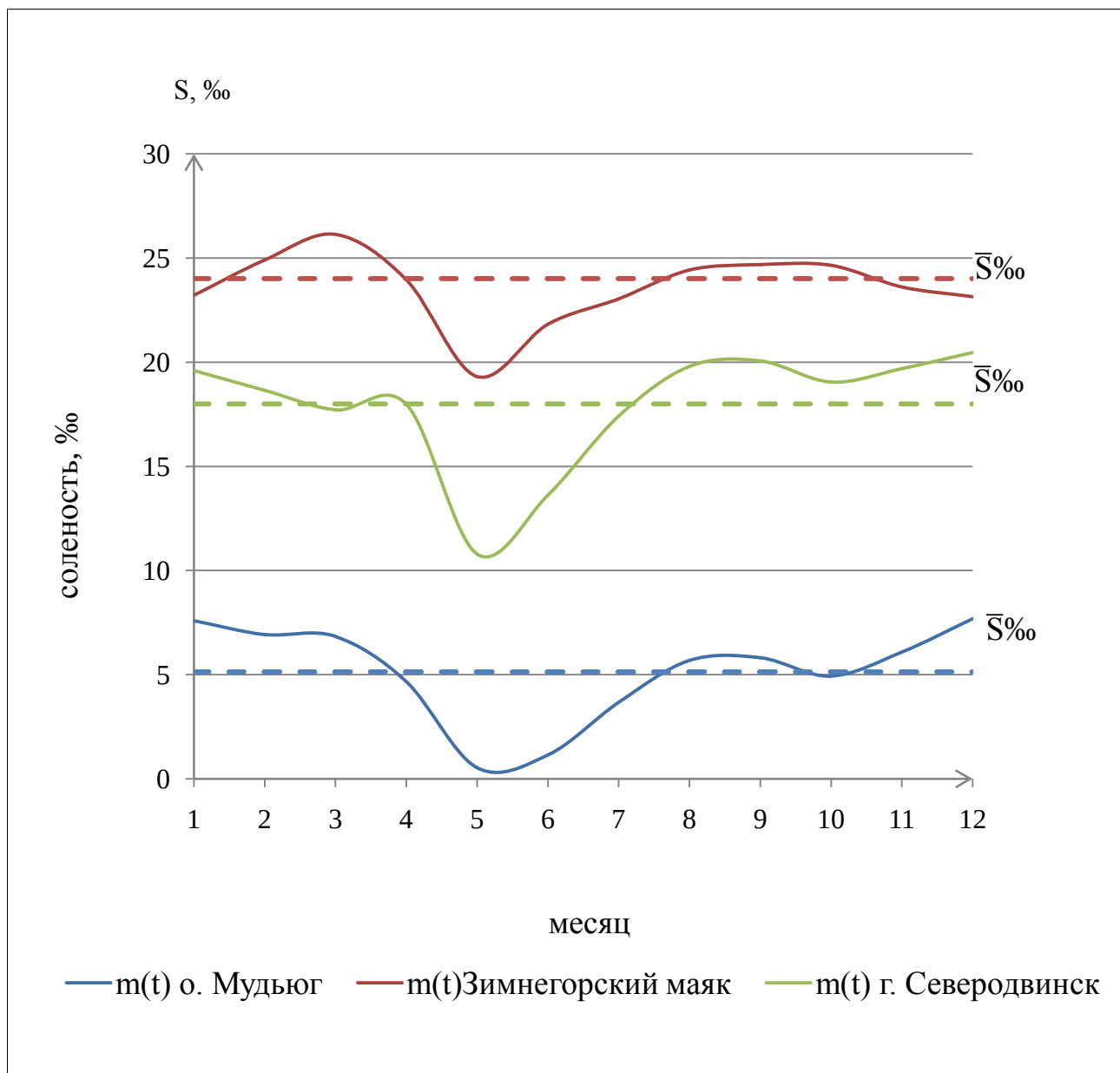


Рисунок 4.1 — Графики оценки математического ожидания внутригодового хода солености со средним годовым значением

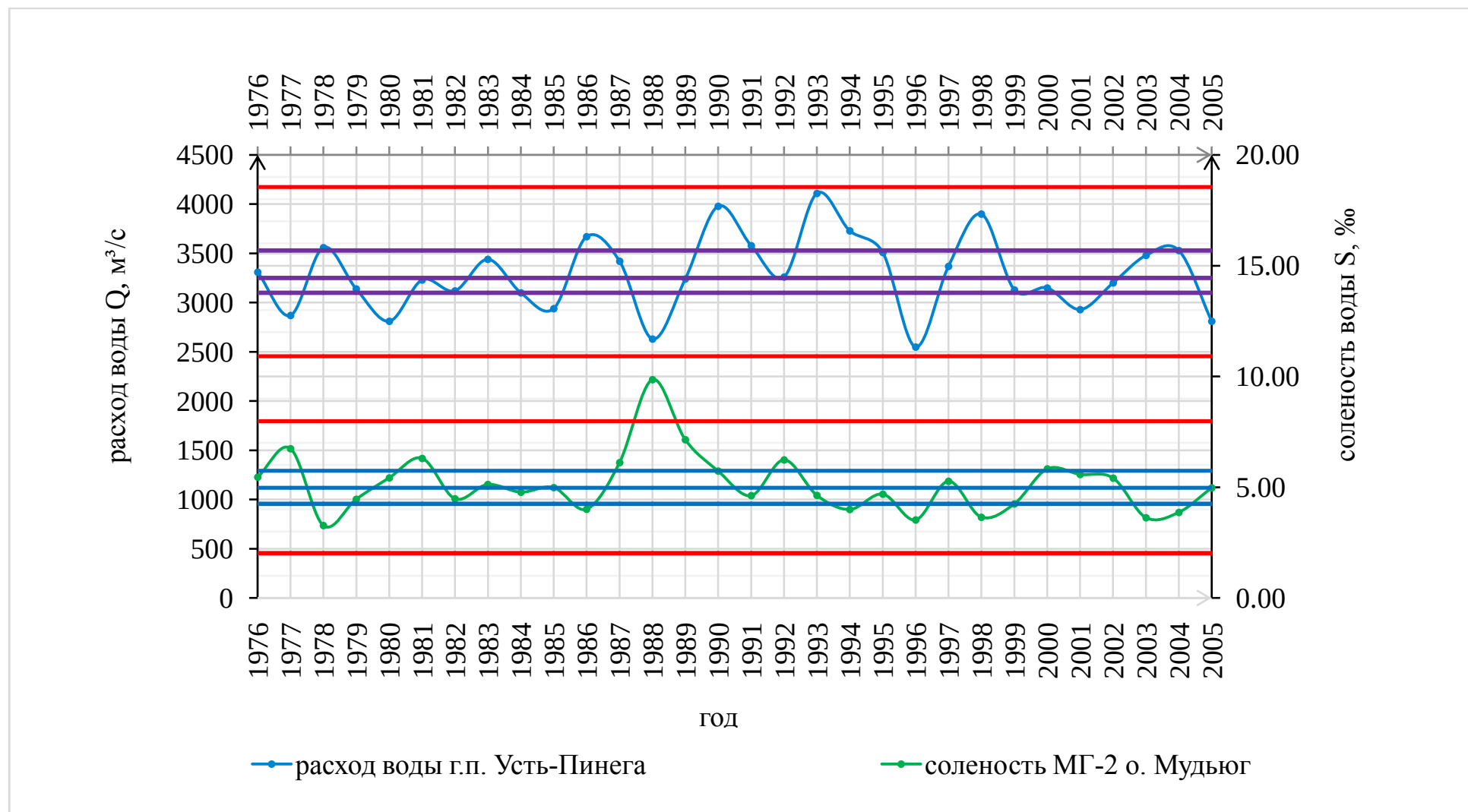


Рисунок 4.2 — Ряды среднегодовых значений солености на станции о. Мудьюг и среднегодовых расходов воды по посту с. Усть-Пинега

Из рисунка видно, что в отдельные годы – 1977, 1988, 1992, 2005 гг. низкому расходу воды соответствует высокая соленость и наоборот – 1978, 1986, 1990, 1993, 1998, 2003, 2004 гг. высокому расходу воды соответствует низкая соленость, что подтверждает гипотезу о влиянии стока на соленость воды. Существует ряд лет, не совпадающих с данным утверждением. Возможно, в эти годы на режим солености оказывали влияние другие солеобразующие факторы.

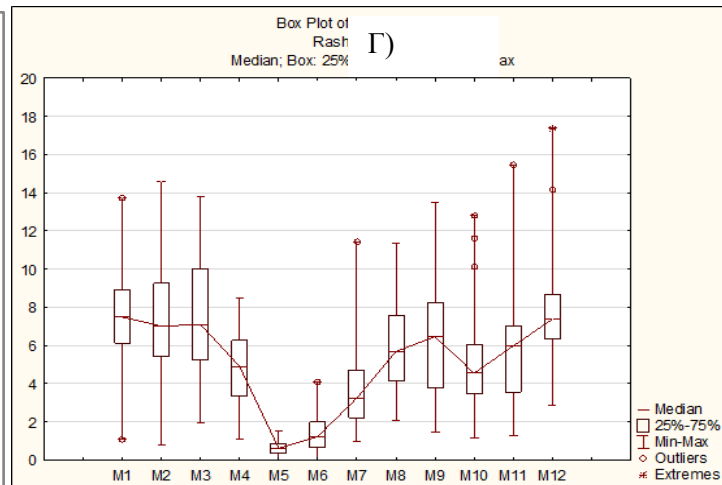
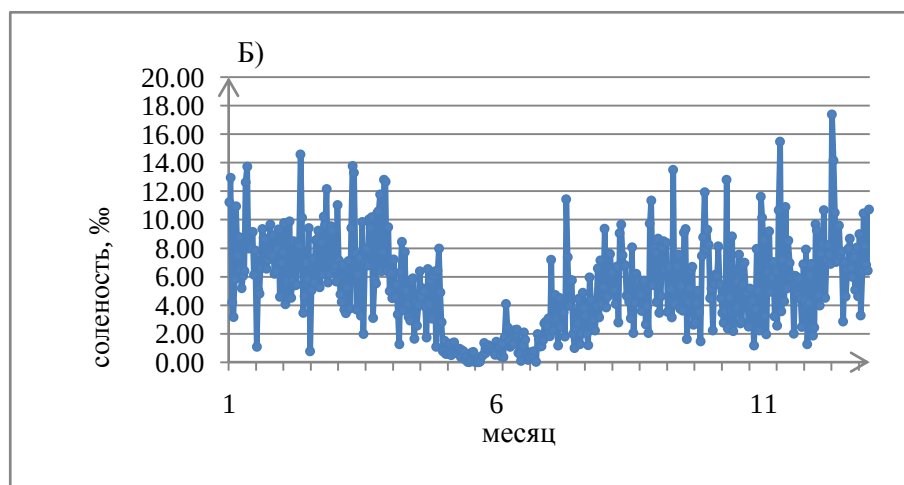
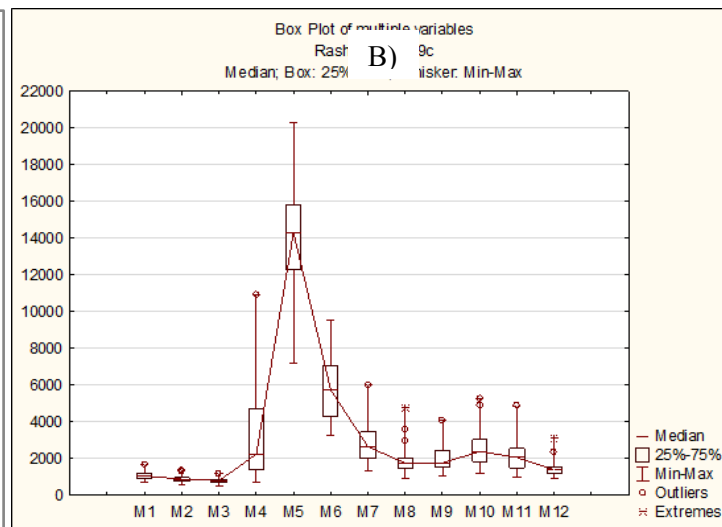
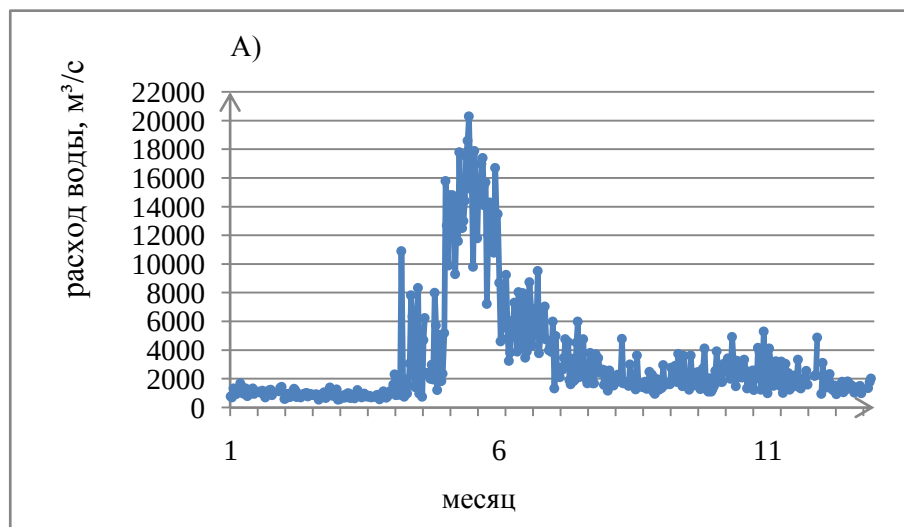


Рисунок 4.3 — Внутригодовой ход среднемесячных значений расходов и солёности воды по гидропосту Усть-Пинега и по морской станции о. Мудьюг

На рисунке 4.3 приведены совмещенные на периоде в один год данные наблюдений над расходами воды (А) и соленостью (Б), также внутригодовой ход расходов (В) и солености (Г) по данным квантильного анализа.

Река Северная Двина относится к группе рек Восточно-Европейского типа режима по классификации Б.Д. Зайкова. Гидрологический режим реки Северная Двина характеризуется высоким весенним половодьем, сравнительно низкой летней меженью с дождевыми паводками и низкими уровнями зимой, что отчетливо видно на рисунке 4.3 (А).

Годовой ход солености воды, измеряемой на морской станции о. Мудьюг (рисунок 4.3 Б), практически зеркально отражает годовой ход стока реки Северная Двина: минимум солености совпадает с максимумом стока и наблюдается в апреле, в период весеннего половодья; нисходящая ветвь годового хода солености совпадает с восходящей ветвью годового хода стока и наоборот; зимний максимум солености совпадает с минимумом речного стока периода межени; в период осеннего половодья наблюдается вторичный минимум солености.

Анализируя квантильные диаграммы можем наблюдать, что в целом выбросов (кружочки) и выпадающих значений (звездочки) немного. Выпадающие значения – это либо ошибка, либо событие редкой повторяемости, сформированными иными процессами, чем данные ряда и не соответствуют критериям однородности ряда. Масштаб изменчивости оценивается по размаху (границами «ящика»: квартиль 75% – квартиль 25%), включающих в себя половину наблюдений, – это аналог стандартному отклонению в классической статистике, основанной на нормальном распределении исходных данных. Центр положения оценивается медианой (при нормальном распределении совпадает с арифметическим средним). Смещение медианы от центра ящика свидетельствует об асимметричности распределения.

Для получения количественных оценок влияния речного стока реки Северная Двина на соленость устьевой области реки воспользуемся регрессионным анализом.

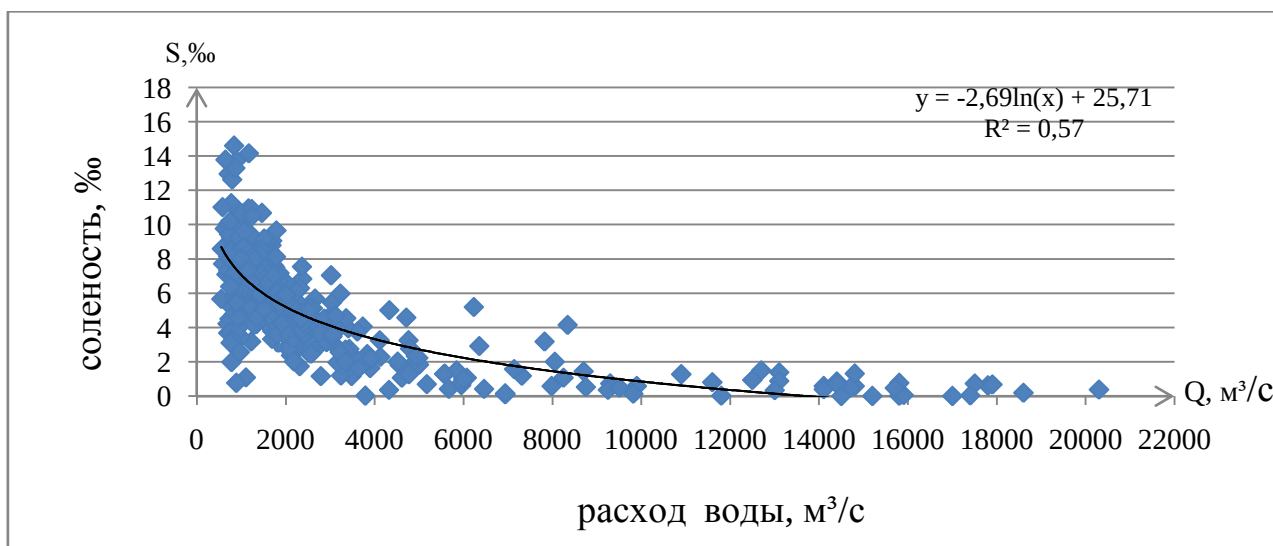


Рисунок 4.4 — График связи среднемесячных расходов реки Северная Двина и солености воды на станции о. Мудьюг за рассматриваемый период

Из графика видно, что зависимость нелинейна. С учетом значений коэффициента детерминации $R^2 = 0.57$ ($R = 0,76$) 57% изменчивости солености обусловлено расходами воды.

Для детализации особенностей влияния речного стока на соленость воды для отдельных месяцев года воспользуемся результатами расчета коэффициентов взаимной корреляции, приведенных в таблице 4.1. Как видно из анализа данной таблицы, значения коэффициентов внутригодовой корреляции между расходом реки Северная Двина и значениями солености на станции о. Мудьюг с июля по ноябрь $R > -0.50$. Необходимо отметить, что в апреле и декабре этот коэффициент составляет -0.52 и -0.54 соответственно.

Таблица 4.1 — Значение коэффициентов взаимной корреляции между расходами р. Северная Двина гп. Усть-Пинега и значениями солености воды по МГ-2 о. Мудьюг внутри года

	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
январь	-0,40	-0,27	-0,43	-0,10	0,13	0,37	-0,25	-0,39	-0,19	-0,16	-0,06	0,03
февраль	-0,28	-0,15	-0,38	-0,19	0,17	0,37	-0,12	-0,22	-0,13	-0,16	-0,12	-0,04
март	-0,16	0,13	-0,17	-0,32	0,00	0,34	-0,08	-0,03	-0,11	-0,17	-0,12	-0,14
апрель	0,17	0,12	0,01	-0,52	-0,26	0,40	0,11	0,05	0,04	-0,07	0,03	-0,24
май	0,13	0,03	-0,07	-0,04	-0,24	-0,43	-0,07	0,19	-0,16	0,02	0,00	-0,07
июнь	-0,10	0,06	-0,02	0,32	0,14	-0,42	-0,43	-0,24	-0,24	-0,24	-0,09	0,09
июль	-0,41	-0,23	-0,33	0,09	0,01	-0,06	-0,64	-0,62	-0,44	-0,44	-0,05	0,06
август	-0,31	-0,02	0,05	0,38	0,11	0,02	-0,43	-0,64	-0,46	-0,39	0,03	0,40
сентябрь	0,00	0,31	0,19	0,19	0,07	0,07	-0,26	-0,27	-0,60	-0,58	-0,35	0,16
октябрь	-0,01	0,27	0,16	-0,04	0,13	0,34	-0,06	-0,02	-0,30	-0,59	-0,45	-0,11
ноябрь	0,03	0,06	-0,07	-0,13	0,33	0,29	0,00	0,14	-0,05	-0,23	-0,69	-0,48
декабрь	0,10	-0,05	-0,03	-0,10	0,29	0,20	0,05	0,22	0,22	0,00	-0,36	-0,54

Регрессионные зависимости между расходами воды и соленостью на станции о. Мудьюг для характерных месяцев года приведены на рисунках 4.5 – 4.7.

Зависимости не линейные и достаточно хорошо описываются логарифмическими уравнениями.

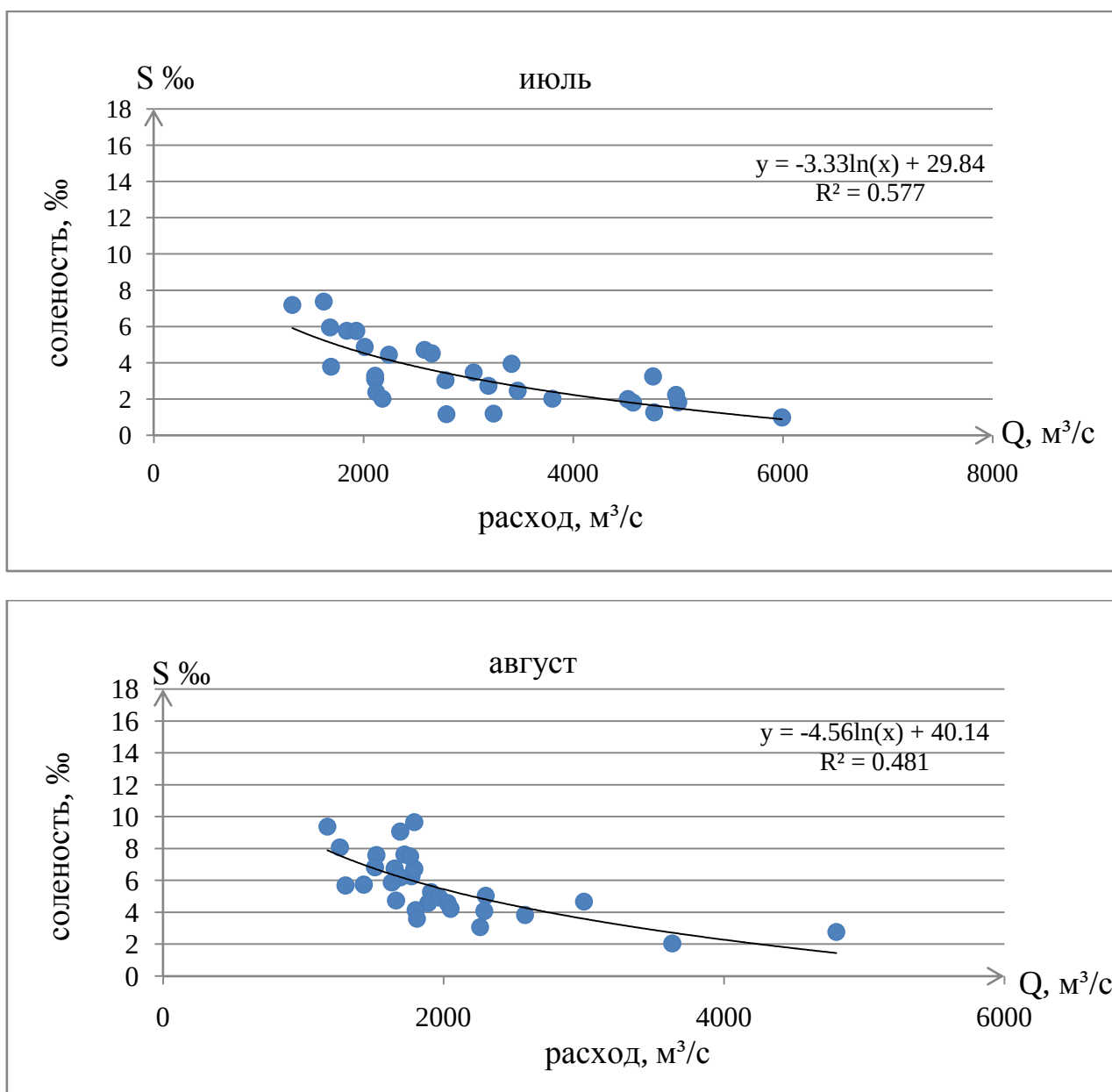


Рисунок 4.5 — График связи среднемесячных расходов реки Северная Двина и солености воды на станции о. Мудьюг для июля, августа за рассматриваемый период

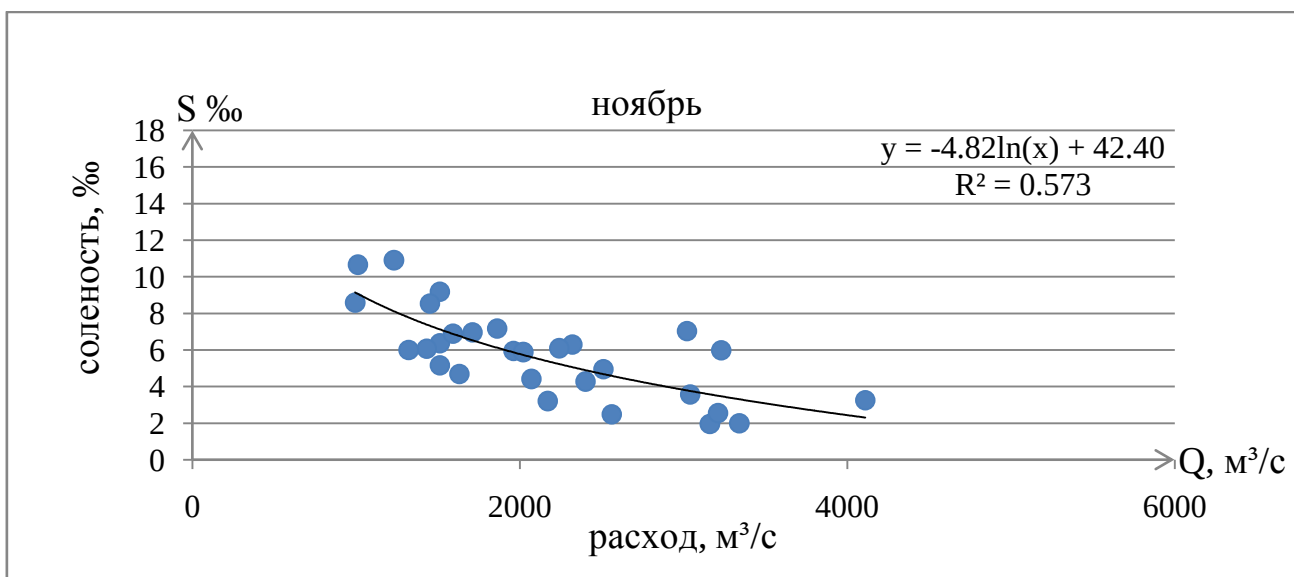
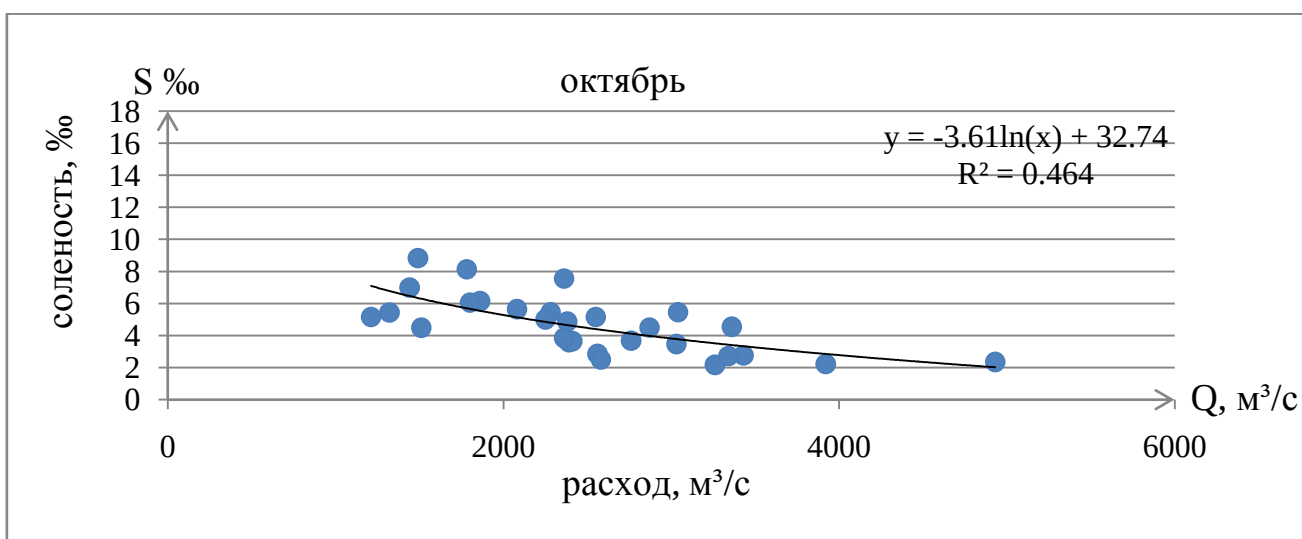
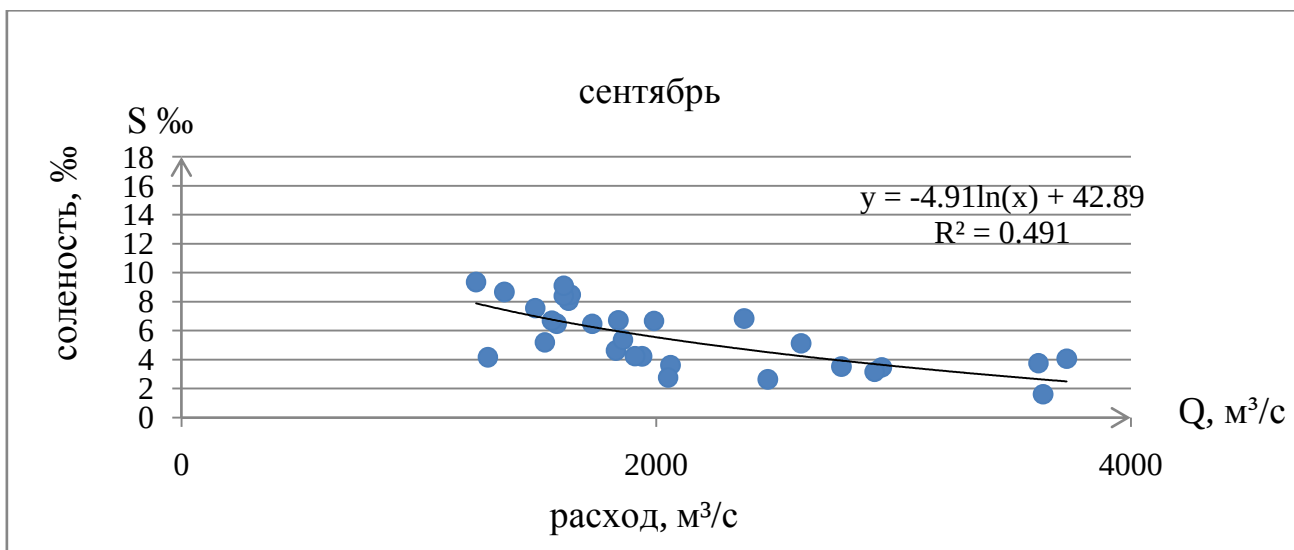


Рисунок 4.7 —.График связи среднемесячных расходов реки Северная Двина и солености воды на станции о. Мудьюг для июля, августа за рассматриваемый период

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе выполнен анализ многолетних (межгодовых) и внутригодовых колебаний водности реки Северной Двины и солености по береговым станциям Белого моря с использованием данных среднегодовых, среднемесячных значений расходов воды по постам г.п. с. Усть-Пинега (с 1976 по 2005 гг), г.п. д. Звоз (с 1976 по 2005 гг), г.п. д. Абрамково (с 1976 по 2005 гг) на реке Северная Двина и значений солености по морским береговым станциям Белого моря: МГ-2 о. Мудьюг (с 1976 по 2005 гг), МГ-2 г. Северодвинск (с 1976 по 2012 гг), МГ-2 Зимнегорский маяк (с 1985 по 2014 гг). Также измеренные значения за соленостью морских вод, выполненные во время сезонных съемок в навигационный период сотрудниками Северодвинской устьевой станции на разрезах пр. Маймаксас 1990 по 2012 год.

Многолетние колебания стока и солености воды анализировались по данным среднегодовых величин, а также по ежегодным последовательностям значений для каждого месяца года. Реализация среднегодовых расходов воды и значений солености рассматривались как стационарные случайные процессы. Ежегодные последовательности значений рассматривались как стационарные и стационарно-связанные случайные процессы. Для оценки многолетней и внутригодовой изменчивости стока и значений солености использовался метод математической статистики (квантильный анализ данных, метод периодически коррелированных случайных процессов, корреляционный анализ, регрессионный анализ и низкочастотная фильтрация Баттерворта), что значительно повышает достоверность полученных результатов.

Выполненный совместный анализ показал наличие многоводных и маловодных групп лет в стоке реки Северная Двина на рассмотренных постах и групп лет с повышенной и пониженной соленостью на анализируемых

станциях, которые наблюдались как разрозненно, так и группировались в фазы и циклы. Для их характеристики применялся квантильный анализ данных с использованием средних годовых значений, где каждый временной ряд рассматривается как реализация случайного процесса $x(t)$, за основную вероятностную характеристику которого принимается функция распределения $F(x)$ и ее квантили x_p . В качестве основных вероятностных характеристик использовались квантили $X_{\min}$, $X_{0.25}$, $X_{0.5}$, $X_{0.75}$, $X_{\max}$, и другие, основанные на них, расчетные параметры.

Анализ реализаций среднегодовых значений солёности и расходов воды показал, что в многоводные годы (1978, 1986, 1990, 1993, 1998 и т.д.) наблюдалась более низкая солёность и наоборот, в маловодные (1977, 1988, 2005 и т.д.) – повышение значений солёности, что подтверждает гипотезу о влиянии стока на солёность. Существует ряд лет, не совпадающих с данным утверждением. Возможно, это связано с тем, что в эти годы на режим солёности оказывали влияния другие факторы.

Для аппроксимации корреляционных зависимостей межгодовой изменчивости стока реки Северная Двина и значений солёности по морским береговым станциям, рассчитанных для каждого месяца года, использована модель авторегрессии первого порядка.

Анализ модели авторегрессии показал, что коэффициенты корреляции стока для всех постов реки Северная Двина незначимы $R \leq 0.3$. Коррелированность процесса от года к году отсутствует. Что касается солёности, то незначимыми явились коэффициенты корреляции солёности по станции г. Северодвинск $R \leq 0.2$. По другим станциям для некоторых месяцев выявлена некоторая межгодовая связь с коэффициентом корреляции $R \geq 0.5$. Для объяснения незатухающего характера корреляционных зависимостей межгодовой изменчивости солёности воды по наблюдениям на станции Зимнегорский маяк за январь – март и июль – сентябрь, привлекалась низкочастотная фильтрация Баттерворта.

Результаты фильтрации показали наличие трендов или периодов локальной нестационарности, которые и приводят к увеличению коррелированности процессов в эти месяцы. Например, в январе 1985 года средний уровень солености составлял 24.8 ‰ в конце периода 22.0 ‰. Значение солености понизилось на 2.8 ‰. За десятилетие в среднем на 1.4 ‰. С февраля 1985 года за исследуемый период соленость понизилась на 4.2‰. Для других анализируемых месяцев наблюдается тенденция на увеличение солености за первое десятилетие рассматриваемого периода в среднем на 1.7 ‰ и понижение в следующие 10 лет на 1.6 ‰. Наличие тренда связано с влиянием какого-то другого солеформирующего фактора. Аналогичного тренда для соответствующих ежегодных последовательностей речного стока не наблюдалось.

Речной сток отличается большой неравномерностью. Особенности влияния речного стока на режим Белого моря определяется свойствами внутригодового хода и многолетних колебаний водности рек водосбора.

Для предварительной оценки существования связи между рядами расходов и солености выполнен разведочный анализ в виде взаимного квантильного анализа данных. В общем облаке точек видна некоторая закономерность: областям максимальных значений стока соответствуют области минимальных значений солености, областям минимальных — области максимальных значений. Наличие отскакивающих точек свидетельствует о том, что речной сток является не единственным фактором, формирующим режим солености. Учитывая это можно говорить, что связь между среднемесячными величинами речного стока и солености существует.

В качестве исходной информации для анализа внутригодового колебания речного стока, в настоящей работе использованы среднемесячные расходы воды по реке Северная Двина по гидрологическим постам — д. Абрамково, д. Звоз, с. Усть-Пинега. В качестве исходной информации для анализа внутригодового колебания солености — среднемесячные значения солености по

морским береговым станциям – о. Мудьюг, Зимнегорский маяк, г. Северодвинск.

Для анализа внутригодового хода речного стока и значений солёности применен метод теории ПКСП (Периодически коррелированных случайных процессов).

Внутригодовые колебания стока реки анализировались по реализациям среднемесячных расходов воды и значениям солёности, которые рассматривались как периодически коррелированные случайные процессы. В качестве основных вероятностных характеристик внутригодового хода использовались оценки математического ожидания $m(t)$, дисперсии $D(t)$, при $\tau=1$ месяц и $\tau=1$ год изменчивости.

Так, графики оценок математического ожидания $m(t)$ стока р. Северная Двина имеют вид кривых с плавным подъемом, выраженным половодьем и плавным спадом. Основной максимум наблюдается в период весеннего половодья (апрель-май). Минимумы на кривых математического ожидания $m(t)$ соответствуют зимней межени. Кривые дисперсии $D(t)$ повторяют все особенности кривых $m(t)$. Такой ход графиков оценок $m(t)$ и $D(t)$ свидетельствуют о том, что межгодовая изменчивость анализируемых процессов происходит преимущественно в виде амплитудной модуляции характерных элементов внутригодового хода, как было отмечено при анализе исходных реализаций среднемесячных расходов. Известно, что р. Северная Двина по климатическим особенностям формирования стока относится к группе рек Восточно-Европейского типа режима по классификации Б.Д. Зайкова. Для рек этого типа характерны высокое весеннее половодье, ежегодно повторяющиеся летне-осенние паводки и очень низкая зимняя межень.

Анализ реализаций внутригодового хода среднемесячных значений стока и солёности воды показывает, что внутригодовой ход солёности практически зеркально отражает внутригодовой ход стока реки Северная Двина:

минимум солености совпадает с максимумом стока и наблюдается в апреле, в период весеннего половодья; нисходящая ветвь внутригодового хода солености совпадает с восходящей ветвью внутригодового хода стока и наоборот; зимний максимум солености совпадает с минимумом речного стока периода межени; в период осеннего половодья наблюдается вторичный минимум солености.

На графиках оценок математического ожидания $m(t)$ солености по всем анализируемым станциям основной минимум наблюдается в мае, что связано с прохождением волны половодья. По станции Зимнегорский маяк это единственный минимум, по Северодвинску наблюдаются вторичные минимумы, приходящиеся на октябрь и май, по станции о. Мудьюг в октябре. Вторичные минимумы в октябре, по-видимому, связаны с выпадением осадков, в мае, возможно, связан с ледотаянием. При этом форма графиков оценки $m(t)$ на станциях о. Мудьюг и г. Северодвинск практически совпадают. Различие состоит лишь в разном уровне среднесуточных значений, что связано с большим влиянием беломорских вод у г. Северодвинска. На графике оценки $m(t)$ Зимнегорский маяк обращает на себя внимание вторичный минимум зимой, что может быть связано с непромерзающим источником пресной воды ручья Каменный, который распресняет морские воды.

График оценки дисперсии $D(t)$ по станции о. Мудьюг повторяет основной минимум математического ожидания, но при этом наблюдаются три вторичных минимума в феврале, августе и октябре, которые фактически повторяют минимумы на кривой оценки математического ожидания.

На графиках по другим двум станциям оценка дисперсии $D(t)$ практически зеркально отражает ход оценки $m(t)$, но с некоторым сдвигом во времени, что говорит о влиянии на соленость других солеформирующих факторов.

Графики оценок корреляционных зависимостей внутригодовой изменчивости $K(t, \tau)$, $\tau=1$ месяц по солености также как и у речного стока быстро затухают на начальном участке и продолжают флуктуировать с

незначительными отклонениями от нулевого уровня в дальнейшем. Графики оценок внутригодовых корреляционных зависимостей практически симметричны и одинаковы для всех месяцев года.

Для получения количественных оценок влияния речного стока реки Северная Двина на соленость устьевой области реки проведен регрессионный анализ рядов. Анализ показал, что зависимость нелинейна. С учетом значений коэффициента детерминации $R^2 = 0.57$ ($R = 0,76$) 57% изменчивости солености обусловлено расходами воды.

Для детализации особенностей влияния речного стока на соленость воды для отдельных месяцев года рассчитаны коэффициенты взаимной корреляции. Результат показал, что значения коэффициентов внутригодовой корреляции между расходом реки Северная Двина и значениями солености на станции о. Мудьюг с июля по ноябрь $R > -0.50$. Необходимо отметить, что в апреле и декабре этот коэффициент составляет -0.52 и -0.54 соответственно.

Регрессионные зависимости между расходами воды и соленостью на станции о. Мудьюг для характерных месяцев года не линейные и достаточно хорошо описываются логарифмическими уравнениями.

Выполненный анализ показал, что зависимость соленой воды от величины расхода воды хорошо прослеживается в течение сезона или года. Основное влияние стока реки Северная Двина на режим солености устьевой области происходит во время половодья, а также осенью во время прохождения дождевых паводков в зависимости от удаления от устья реки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гидрология устьевой области Северной Двины [Текст]/ М.И. Зотин, В.Н. Михайлов.–М.: Гидрометеорологическое издательство, 1965.
2. Водный кадастр РФ. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши [Текст]. Т.1 вып. 8 Бассейны Онеги, Северной Двины и Мезени.– отв.редактор– Северное УГМС.1976 – 2005.
3. Водный кадастр РФ.Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек [Текст]. Т.2 ч.1, 2.– отв.редактор–Северное УГМС.1976 – 2012.
4. Рожков, В.Г. Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерамиКнига 1[Текст]/ В.Г. Рожков.–СПб.: Гидрометеиздат 2001.
5. Рожков, В.Г. Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерамиКнига 2[Текст]/ В.Г. Рожков.–СПб.: Гидрометеиздат 2001.
6. Лупачев Ю.В. Особенности проникновения соленой воды в приливное устье реки (на примере устья Северной Двины) [Текст].//Труды ГОИН. Вопросы гидрологии устьев рек.–1976.–Вып. 129.– С.37 – 52.
7. Вопросы гидрологии и гидрохимии устьев рек [Текст]/ С.С. Байдин.–М.: Гидрометиздат Труды ГОИН. 1974.Вып. 118.
8. Царев В.А. Влияние речного стока на гидрологические процессы в море (на примере Белого моря) [Текст].//Автореферат дис.насоиск.уч.степ.канд.физ.–мат.наук.–Л.,1979
9. Тьюки Дж. Анализ результатов наблюдений. Разведочный анализ/Пер. с англ.–М.:Мир, 1981.
10. Межвузовский сборник [Текст]. География и современность.СПб.: Изд. РГГМУ 1992.–Вып.6.
11. Весник Ленинградского университета выпуск 1 серия 7 Геология География 1990. Типография Изд-ва ЛГУ.

