



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

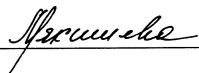
Кафедра Гидрологии суши

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

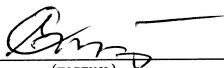
На тему **Изменение климата и его
влияние на гидрологические
характеристики Северной Двины**

Исполнитель Сумачев Александр Эдуардович 
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель Доктор географических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Мякишева Н.В. 
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

Кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Сикан Александр Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

«18» июня 2018 г.

Санкт-Петербург
2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	2
ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА	
1.1 Исходные данные и обзор методов исследования.....	4
1.2 Общие сведения	12
1.3 Характеристика бассейна р. Северная Двина	13
КЛИМАТ.....	17
2.1 Общие сведения о климате.....	17
2.2 Многолетние колебания основных характеристик климата.....	20
ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК.....	31
3.1 Ледовый режим рек.....	31
3.1 Водный режим рек.....	35
3.2 Ледоходные уровни.....	40
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК	
СТОКА.....	48
4.1 Методы прогнозирования и оценки качества прогнозов.....	48
4.2 Прогноз максимальных ледоходных уровней.....	52
4.3 Прогноз временных рядов.....	70
4.4Прогноз максимального годового расхода воды	80
 Заключение.....	 89
Литература.....	95
Приложения	

ВВЕДЕНИЕ

Освоение территорий Европейского Севера требует новых исследований в области гидрологии и метеорологии, а также климатологии. Одним из крупнейших бассейнов Северного края является бассейн Северной Двины.

Северная Двина под названием Малая Северная Двина образуется слиянием рек Сухона и Юг в городе Великий Устюг, главной гидрологической проблемой которого являются мощные заторы льда, повторяющиеся регулярно.

Глобальное потепление в первую очередь оказывают свое влияние на северные области. Под действием изменений климата в значительной степени трансформируется весь гидрологический режим, отмечается: падение летних меженных расходов и рост зимних, смещение всех фаз гидрологического режима (сроков замерзания и вскрытия, сроков и продолжительности весеннего половодья, межени), снижение толщины ледяного покрова, изменение максимальных и минимальных расходов воды. Повышение средnezимних температур приводит к более длительному замерзанию рек, в основном по зажорному типу, что увеличивает риск зажоров и, как следствие, заторов льда при вскрытии. Усовершенствование методик прогноза заторных наводнений необходимо как вследствие изменений значимости вкладов осенних и весенних факторов в прогнозные зависимости, так и тем, что, по мнению специалистов-гидрологов, прогнозные уравнения требуют уточнения каждые 4-5 лет, особенно после прохождения выдающихся наводнений. Учет данных изменений необходим при планировании водопотребления, разработки противозаторных мероприятий, а также при расчете длительности навигационного периода.

Наука в то же время не стоит на месте - появляются новые методы анализа, использование которых сулит большие выгоды. Возможности традиционных методов, по мнению Ю.Б.Виноградова, были доведены до

предела еще 30 лет назад. Однако он отмечает, что и моделирование речного стока не смогло предложить ничего надежного и простого.

В последнее время все большую популярность набирают исследования с использованием нейронных сетей. Являясь чрезвычайно гибким и простым механизмом, нейронные сети в ближайшее время способны вытеснить многие традиционные методы. Главным преимуществом нейронных сетей является их универсальность, способность работать с любой информацией и, конечно же, обучаемость. Физически обучаемость заключается в нахождение коэффициентов связи между входом и выходом, которые могут быть нелинейными. Полностью оправдав надежды, возложенные на них в области классификации, распознавания образов и прогнозирования, нейронные сети завоевывают всё больше расположения видных ученых в различных областях.

Из всего выше сказанного следует, что основная цель данной работы заключается в комплексном описании водного режима Северной Двины и ее притоков в современных условиях.

Для достижения поставленной цели следует решить следующие задачи

- 1) Собрать всю доступную информацию по региону
- 2) Выполнить физико-географическое описание изучаемой территории
- 3) Оценить современное состояние климата
- 4) Оценить разномасштабные колебания водности рек бассейна Северной Двины в условиях изменяющегося климата
- 5) Составить прогностические зависимости, опирающиеся на современные методы, оценить их и дать прогноз

ГЛАВА I. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА

1.1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ОБЗОР МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Создание современных баз данных гидрологических характеристик в электронном варианте необходимо для оперативных решений прогностических задач, включающего сочетание их с климатическими сценариями, помощь административным органам в принятии решений в случае возникновения чрезвычайных ситуаций при прохождении весенних половодий и дождевых паводков, в ходе которых могут затопливаться обширные территории и наноситься огромный материальный ущерб.

Данные о характере ледовых явлений, их продолжительности необходимы для обеспечения работы судоходства и ледовых переправ через реки.

Анализ изменений гидрологических характеристик за многолетний период позволяет выявить тренды.

База гидрологических данных включает в себя 14 гидрологических постов за период с 1950 по 2015 гг (таблица 1.1.1). Данные взяты с 1950 г, а не с начала наблюдений, так как база данных предназначена для обеспечения методик прогноза заторных наводнений. Одним из основных аргументов в прогнозных методик является толщина льда, наблюдения за которой начались только с 1950 г.

Для всех 14 створов в базе данных представлены сведения о ежедневных уровнях воды, ледовых явления, максимальных величинах толщины льда, с указанием дат, когда они наблюдаются, ежемесячных максимальных и минимальных величинах уровней воды и датами, когда они наблюдаются. Кроме того, представлены данные по характерным уровням воды за многолетний период. В качестве примера в таблице 1.1.2 приведены данные по характерным уровням р. Северная Двина – д. Усть-Курье.

Таблицы по характерным расходам подготовлены для следующих створов:

1. Северная Двина – д. Абрамково;
2. Северная Двина – д. Звоз;
3. Северная Двина – с. Усть-Пинега;
4. Сухона – г. Тотьма;
5. Сухона- д. Каликино;
6. Ема – д. Новое;
7. Юг – с. Кичменгский Городок.

Таблица 1.1.1 - Состав базы данных по Северной Двине

Река пост	Код поста	Расстояние от устья, км	F, км ²	Отм."0" поста, м БС	Принадлежность поста	Уровень выхода воды на пойму, см над "0" поста	Нежд	Qезд	Hмакс.лдст	Hmin,max	Табл. хар. Н и Q
Северная Двина - д. Медведки	70057	718	86900	45,91	Севгидромет	559	+	-	+	+	+
Северная Двина - г. Котлас	70061	675	88300	40,46	Севгидромет	550-580	+	-	+	+	+
Северная Двина - д. Усть-Курье	70062	657	209000	39,45	Севгидромет	450	+	-	+	+	+
Северная Двина - д. Абрамково	70066	520	220000	26,08	Севгидромет	б/п	+	+	+	+	+
Северная Двина - с. Нижняя Тойма	70067	455	227000	21,07	Севгидромет	700	+	-	+	+	+
Северная Двина - д. Сидоровская	70069	380	236000	15,33	Севгидромет	600	+	-	+	+	+
Северная Двина - д. Березник	70700	346	278000	11,87	Севгидромет	750	+	-	+	+	+
Северная Двина - д. Звоз	70072	279	285000	5,78	Севгидромет	700	+	+	+	+	+
Северная Двина - с. Усть-Пинега	70801	131	348000	1,57	Севгидромет	б/п	+	+	+	+	+
Сухона - г. Тотьма	70091	277	34800	98,56	Севгидромет	823	+	+	+	+	+
Сухона - д. Каликино	70098	39	49200	54,29	Севгидромет	885	+	+	+	+	+
Сухона - г. Великий Устюг	70101	3	503000	49,34	Севгидромет	936	+	-	+	+	+
Ема - д. Новое	70120	23	179	134,21	Севгидромет	250	+	+	+	+	+
Юг - с. Кичменгский Городок	70152	244	8890	91,6	Севгидромет	600	+	+	+	+	+

Таблица 1.1.2 - Характерные уровни воды за гидрологический год р. Северная Двина – д. Усть-Курье.

Гидрол.год	Максимальные уровни воды						Минимальные уровни воды					Максимальный уровень	
	Дата	Н _{мах} вес., см	Лед. явл.	Дата	Н _{мах.} год, см	Лед явл.	Дата	При своб. русле	Дата	При лдст	Лед. явл.	при лдст, см	Дата
1949-50	24.апр	415	Л	01.05.50	543	св.	07.09.50	99	27.11.49	84	лдст	198	08.12.49
				02.05.50	543	св.	08.09.50	99					
							09.09.50	99					
1950-1951	09.апр	513	Л	21.04.51	521	св	09.09.51	78	08.11.50	39	лдст	201	24-27.11.50
				22.04.51	521	св	10.09.51	78					
				23.04.51	521	св							

Таблица 1.1.3 - Характерные расходы воды за гидрологический год р. Северная Двина – д. Абрамково.

Максимальные расходы воды, м3/сек						Минимальные расходы воды, м3/сек				
Дата	Q _{max} вес.	Лед. явл.	Дата	Q _{max} . год.	Лед.явл.	Дата	При св. русле	Дата	При лдст.	Лед.явл.
03.05.1950	8020	св	03.05.1950	8020	св	09.09.1950	838	05.03.1950	316	лдст
								06.03.1950	316	лдст
								07.03.1950	316	лдст
								08.03.1950	316	лдст
								09.03.1950	316	лдст
								10.03.1950	316	лдст
								12.03.1950	316	лдст
								13.03.1950	316	лдст
								14.03.1950	316	лдст
24.04.1951	7520	св	24.04.1951	7520	св	11.09.1951	703	28.03.1951	372	лдст

Вся исходная информация по гидрологическим постам была взята из гидрологических ежегодников, которые находятся в распоряжении библиотеки ФГБУ «Государственный гидрологический институт». Для формирования ряда наблюдений за период с 1950 г по 2014 г понадобилось 65 ежегодника. Пример таблицы суточных уровней воды по гидрологическому посту р. Северная Двина - г. Котлас, представленной в гидрологическом ежегоднике за 1993 г, приведен на рисунке 1.1.1.

Т.1 Вып.8 1993												
22. р.Северная Двина - г.Котлас												
Отметка нуля поста 40.46 м БС												
Число	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	144 I	84 I	58 I	76 I	484	466	261	184	204	160	131 II	162 I
2	142 I	83 I	57 I	78 I	480	442	255	176	202	153	127 II	161 I
3	139 I	82 I	57 I	80 I	515	425	248	165	196	147	122 II	159 I
4	135 I	81 I	57 I	82 I	556	403	231	161	181	142	119 II	156 I
5	131 I	79 I	57 I	86 I	594	385	219	153	169	138	113 II	153 I
6	127 I	77 I	57 I	89 I	641	370	211	147	161	133	109 II	151 I
7	123 I	76 I	57 I	92 I	653	354	209	139	156	127	103 II	151 I
8	120 I	75 I	57 I	94 I	672	337	208	134	154	122	95 II	150 I
9	117 I	74 I	57 I	98 I	677	320	204	132	153	120	97 II	149 I
10	113 I	74 I	57 I	103 I	670	299	204	134	157	117	96 II	145 I
11	110 I	74 I	57 I	111 I	662	282	210	139	161	114	90 II	143 I
12	109 I	73 I	56 I	126 I	653	255	210	146	166	111	77 II	141 I
13	108 I	72 I	56 I	144 I	646	252	201	157	167	111	66 II	139 I
14	105 I	70 I	56 I	172 I	641	244	190	160	167	116	72 II	138 I
15	104 I	69 I	55 I	211 I	640	235	185	157	163	126	98 I	137 I
16	102 I	68 I	55 I	250 I	643	234	181	152	161	142	116 I	134 I
17	102 I	66 I	54 I	277 I	648	236	187	146	158	156	147 I	132 I
18	101 I	65 I	54 I	291 I	652	241	194	139	155	180	160 I	131 I
19	100 I	65 I	56 I	299 I	656	252	197	136	153	194	169 I	130 I
20	99 I	64 I	59 I	302 I	656	262	206	122	156	195	174 I	128 I
21	98 I	64 I	61 I	308 I	656	277	210	129	156	195	175 I	125 I
22	96 I	63 I	63 I	316 I	652	295	210	126	156	195	174 I	123 I
23	95 I	62 I	64 I	320 I	644	307	210	124	155	192	176 I	122 I
24	94 I	62 I	67 I	315 I	628	311	208	122	153	190	170 I	121 I
25	93 I	62 I	70 I	318 I	610	310	205	124	153	183	163 I	119 I
26	92 I	61 I	66 I	379 II	594	303	207	129	155	177	182 I	117 I
27	91 I	61 I	68 I	466 II	577	290	207	133	161	172	179 I	114 I
28	90 I	60 I	69 I	457 II	558	282	210	144	165	163	174 I	112 I
29	89 I		71 I	450 x	538	275	207	169	166	153	168 I	112 I
30	87 I		72 I	450	514	269	198	195	164	145	165 I	111 I
31	85 I		74 I		488		194	202		140	161 I	111 I
Средн.	108	70	60	228	609	307	209	148	164	152	134	135
Высш.	144	84	74	468	680	471	263	202	205	198	183	163
Низш.	85	60	54	75	461	233	180	121	152	110	65	111
Средний уровень	Высший				Низший периода открытого потока				Низший зимнего периода			
	уро- вень	дата		число слу- чая	уро- вень	дата		число слу- чая	уро- вень	дата		число слу- чая
За год	194	680	08.05	I	110	13.10	I	-15	17.10	18.10.92	2	
1932-93	169	747	21.05.74	I	-5	24.07	26.07.73	3	-32	31.10.75	I	

Рисунок 1.1.1 – Информация по суточным уровням воды гидрологического поста р. Северная Двина - г. Котлас, представленная в гидрологическом ежегоднике за 1993

Все данные из ежегодников оцифровывались и переводились в электронный формат. Ниже приведен пример файла в формате электронной таблицы MS Excel, созданной на основе информации из гидрологических ежегодников (рисунок 1.1.2).

	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И	К	Л	М	Н	О	П	Р	С	Т	У	В	Х	У
	2005	Октябрь	Летний	Зимний	Летний	Зимний	Летний	Зимний	Летний	Зимний	Летний	Зимний	Летний	Зимний	Летний	Зимний	Летний	Зимний	Летний	Зимний	Летний	Зимний
1702	1	425		225	Летний	237									258	2	968		519	227	225	
1704	2	430		207	Летний	239									261	3	921		481	223	227	
1706	3	434		225	Летний	240									262	4	858		471	219	238	
1707	4	433		233	Летний	241									274	5	784		453	214	251	
1708	5	432		227	Летний	241									284	6	715		429	209	273	
1709	6	446		219	Летний	241									291	7	655		401	206	296	
1710	7	467		225	Летний	241									298	8	609		373	205	303	
1711	8	478		232	Летний	241									304	9	588		355	211	297	
1712	9	471		244	Летний	240									310	10	581		349	219	288	
1713	10	451		237	Летний	239									321	11	589		343	226	278	
1714	11	420		226	Летний	238									341	12	594		338	236	270	
1715	12	389		240	Летний	236									390	1	596		333	239	266	
1716	13	375		239	Летний	234									479	2	602		324	239	261	
1717	14	357		248	Летний	232									584	3	623		313	232	260	
1718	15	338		273	Летний	230									751	4	660		304	225	258	
1719	16	325		275	Летний	228									911	5	695		293	220	268	
1720	17	311		274	Летний	227									925	6	715		281	218	292	
1721	18	303		269	Летний	226									952	7	741		267	213	328	
1722	19	293		264	Летний	224									964	8	773		258	208	371	
1723	20	285		260	Летний	222									981	9	783		248	210	420	
1724	21	283		256	Летний	220									1017	10	785		243	223	448	
1725	22	279		253	Летний	219									1041	11	726		239	239	464	
1726	23	274		247	Летний	218									1052	12	701		239	244	469	
1727	24	261		241	Летний	217									1061	1	694		241	241	472	
1728	25	250		238	Летний	216									1071	2	685		243	232	463	
1729	26	244		237	Летний	215									1078	3	665		244	225	440	
1730	27	236		236	Летний	213									1080	4	641		239	221	415	
1731	28	220		236	Летний	211									1070	5	612		235	219	395	
1732	29	219		236	Летний	209									1045	6	583		230	219	400	
1733	30	212		236	Летний	207									1017	7	552		227	221	416	
1734	31	217		205	Летний	243									997	8	528		228	223		

Рисунок 1.1.2 – Данные по суточным уровням воды в цифровом формате MS Excel.

В качестве исходной метеорологической информации использовались несколько типов данных: суточные данные по температуре воздуха и осадкам, влажности воздуха, а также данные маршрутных снегосъемок. Данные были получены из архивов ВНИИГМИ-МЦД (Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных), которые находятся в свободно доступе и могут быть загружены с сайта организации (meteo.ru).

В данной работе используются методы математической статистики. Для оценки однородности рядов, использованы критерии Стьюдента и Фишера. Для выявления тенденций в изменении водности реки применялось 3 метода: построение линейного тренда и полиномиальное сглаживание. Значимость линейных трендов оценена при помощи коэффициента корреляции. Для оценки периодов водности задействован квантильный анализ. В целях долгосрочного прогнозирования основных характеристик стока построены линейные и множественные регрессионные модели, обучены нейронные сети; для прогнозирования временных рядов использованы методы

авторегрессии-проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС). Для оценки качества прогнозов использовались метод ГМЦ, принятый в Российской Федерации и коэффициент Нэша-Сатклиффа, применяемый за рубежом.

1.2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Рассматриваемая территория, обычно называемая Северным краем, занимает северо-восточную окраину Европейской территории Российской Федерации. На севере она омывается Белым и Баренцевым морями. С запада на восток. Северный край простирается от меридиана г. Каргополя до Уральских гор и включает в себя бассейны рек Онеги, Северной Двины, Мезени, Печоры и Кары, а также многих сотен малых рек, впадающих в Белое и Баренцево моря между устьями Онеги и Кары.

Охватывая около миллиона квадратных километров площади, Северный край простирается на 650—700 км в меридиональном и на 1000 км в широтном направлении. Крайние южная и северная точки расположены соответственно на 58 и 70° с. ш., а западная и восточная — на 38 и 65° в. д. В пределы рассматриваемой территории входит несколько крупных административных областей: Архангельская с Ненецким национальным округом (без арктических островов, не изученных в гидрологическом отношении), Республика Коми, Вологодская область (без западной ее части) и значительная часть Кировской.

Описываемая территория представляет собой огромную лесистую равнину, почти ничем не защищенную от западных и северо-западных ветров, с которыми связано поступление влажных воздушных масс. Для нее характерны избыточное увлажнение и относительно однообразные природные условия, коренным образом меняющиеся только вблизи полярного круга, где тайга уступает место лесотундре и тундре, да у восточных ее пределов, где равнина сменяется возвышенностями западного Урал. Гидрометеорологическое обслуживание Северного края осуществляется Северным УГМС (г. Архангельск), а на южной ее окраине (верховья бассейна р. Юг) Верхневолжским УГМС (г. Нижний Новгород). Научно-методическое руководство обеспечивается Государственным гидрологическим институтом (г. Санкт-Петербург)

1.2 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.



Рисунок 1.2.1 - Карта изучаемой территории

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. Заселенность территории бассейна от 80 до 85%. Значительная площадь бассейна (около 8.5%) заболочена. Много моховых болот. Вечная мерзлота отсутствует.

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 30700 м³/с. Замерзает в конце октября — начале ноября, вскрывается от начала апреля до начала мая. Ледоход бурный с частыми заторами.

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

ГЛАВА II КЛИМАТ

2.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КЛИМАТЕ

Большая протяженность рассматриваемой территории, как в меридиональном, так и в широтном направлениях и наряду с этим некоторая неоднородность рельефа создают значительное различие климата отдельных ее частей. Особенности климата определяются малым количеством солнечной радиации зимой, влиянием Северного Ледовитого океана, особенно заметным в северной части исследуемого региона, и интенсивным западным переносом воздушных масс.

Для Северного края характерна частая смена воздушных масс при прохождении циклонов со стороны Атлантики. С ними связана пасмурная с осадками погода, теплая и нередко с оттепелями зимой и прохладная летом. Циклоническая деятельность наиболее активно проявляется зимой и осенью, летом она ослабевает.

Поступление воздушных масс арктического происхождения в любое время года сопровождается холодными и сухими северо-восточными ветрами, приносящими резкие похолодания. Наиболее часто их вторжения наблюдаются в летнее время.

Со стороны Сибири зимой нередко поступает континентальный воздух, принося сухую морозную погоду. С юга и юго-востока поступают преимущественно континентальные массы воздуха, охлажденные зимой и прогретые летом. Частая смена воздушных масс придает погоде в течение всего года большую неустойчивость.

Влияние морей сильно сказывается на распределении температуры воздуха по территории. Зимой температура воздуха на побережьях морей выше, чем в удалении от моря, а летом — ниже. Вглубь материка в направлении с запада на восток влияние Атлантики ослабевает. Следовательно, с севера на юг и с запада на восток нарастает континентальность климата, что можно проследить по изменению годовой амплитуды температуры воздуха. Она увеличивается от 23—28° на севере

территории до 30—31° на юге и от 15° на западной границе края до 35° в предгорьях Урала. Наибольшей суровостью климата отличается северо-восточная окраина, особенно горные районы (Полярный Урал).

Совокупность перечисленных факторов обуславливает короткое прохладное лето и длинную холодную зиму с устойчивым снежным покровом, более мягкую в западных районах Северного края и более суровую в восточных. Небольшие местные различия климатических условий связаны с микро и мезоформами рельефа.

Зима продолжается пять-шесть месяцев на западе территории, шесть-семь месяцев на востоке. Средняя температура воздуха за наиболее холодный месяц достигает обычно —20°. Снежный покров устойчив. Характерны частые метели; зимой преобладают ветры южного, юго-западного направлений, средняя скорость которых 3—7 м/сек.

Осадков зимой выпадает до 200 мм; наибольшее количество осадков наблюдается в горах и предгорьях Урала, а в пределах равнинной части территории — на наветренных склонах возвышенностей и уступах плато.

Лето продолжается три—четыре месяца в юго-западных районах, один-два месяца в северо-восточных. Средняя месячная температура не превышает 16—17 С°, заморозки возможны в любом из летних месяцев. Ветры преимущественно северного и северо-восточного направлений, их скорость 2,5—3,5 м/сек., на побережьях морей—4,5—5,5 м/сек. Осадков за летние месяцы выпадает 400—500 мм. Весна непродолжительная. Средняя многолетняя температура воздуха с марта по май отрицательная и составляет пять градусов. Апрельские температуры колеблются от минус 10-14 градусов до 2-3 градусов выше нуля.

При этом среднемесячное значение температуры остается отрицательным на всем рассматриваемом временном промежутке. Имеется

линейный тренд к снижению средней температуры месяца, но, начиная с восьмидесятых годов двадцатого века, заметна тенденция к ее повышению.

Среднемесячная температура в мае, является, как правило, положительной, но в отдельные годы может достигать 4 градусов ниже нуля. Видна четкая тенденция к повышению майской температуры, начиная с 80 годов - в 91 году среднемесячная температура достигла больше семи градусов выше нуля. Так же стоит отметить холодный период начала семидесятых - тогда среднемесячная температура достигала минус четырех градусов.

Июньская температура наиболее стабильна и отличается намного меньшей амплитудой - до семидесятых годов она в среднем составляла плюс десять градусов. Также как в марте и апреле можно выделить холодный период семидесятых. Начиная с восьмидесятых годов, аналогично всем другим рассмотренным месяцам начинается плавное повышение температуры, которая в максимумах достигает семнадцати градусов выше нуля.

Холодный период 70-х, в целом, характерен для многих областей Земного шара и свидетельствует доказательством несостоятельности теории антропогенного потепления за счет выбросов CO₂. С другой стороны, в 1971 году наблюдался минимум солнечной активности.

В юго-западных районах рассматриваемой территории наблюдается аналогичная климатическая картина.

2.2 МНОГОЛЕТНИЕ КОЛЕБАНИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КЛИМАТА

Для оценки изменчивости основных характеристик климата следует проанализировать разномасштабные колебания в значениях температуры и осадков, выделить и оценить значимость линейных трендов.

Для решения поставленной задачи следует отобрать соответствующую метеорологическую информацию и построить хронологические графики рассматриваемых величин.

В бассейне Северной Двины рассмотрены метеостанции в г. Великий Устюг, Вологда за период 1950 по 2014 год.

Средняя температура воздуха на метеостанции Вологда варьируется, от -11,8 (январь) до 16,9 (июль) градусов Цельсия, среднее многолетнее значение температуры воздуха составило 2,2 С°. Однако, в связи с изменением климата, начавшимся в 80 годах 20 века и продолжающимся до сих пор, произошли изменения, как в абсолютных значениях температуры воздуха, так и в ее внутригодовом распределении.

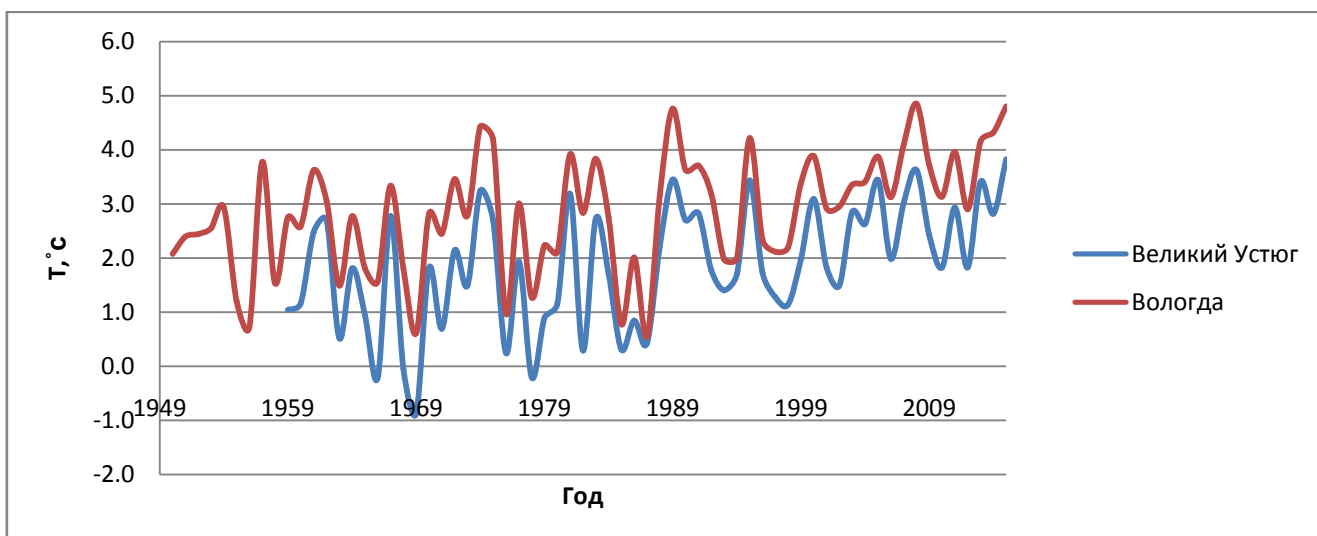


Рисунок 2.2.1 - Хронологический график хода температуры воздуха на метеостанциях Великий Устюг и Вологда

Когерентный ход значений температуры воздуха в пунктах Великий Устюг и Вологда, дают право считать выводы, полученные для одного пункта справедливыми и для другого. Таким образом, на данных станциях наблюдается тренд на повышение среднегодовой температуры воздуха. Данная тенденция обусловлена, как наличием положительных трендов среднезимней температуры воздуха (Рис 2.2.2, 2.2.3) и табл. (2.2.1), так и значимыми трендами летнего периода (рис 2.2.4). Среднезимняя температура воздуха определялась как среднее значение температур с ноября по март. Ноябрь и март считались зимними месяцами при условии среднемесячной температуры меньше трех градусов Цельсия.

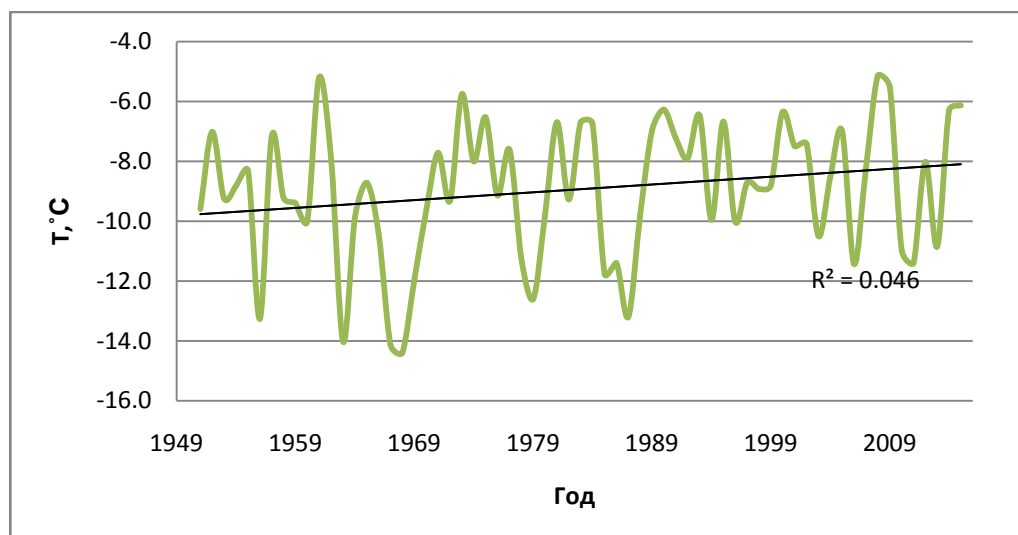


Рисунок 2.2.2 - Среднезимняя температура воздуха на метеостанции Вологда

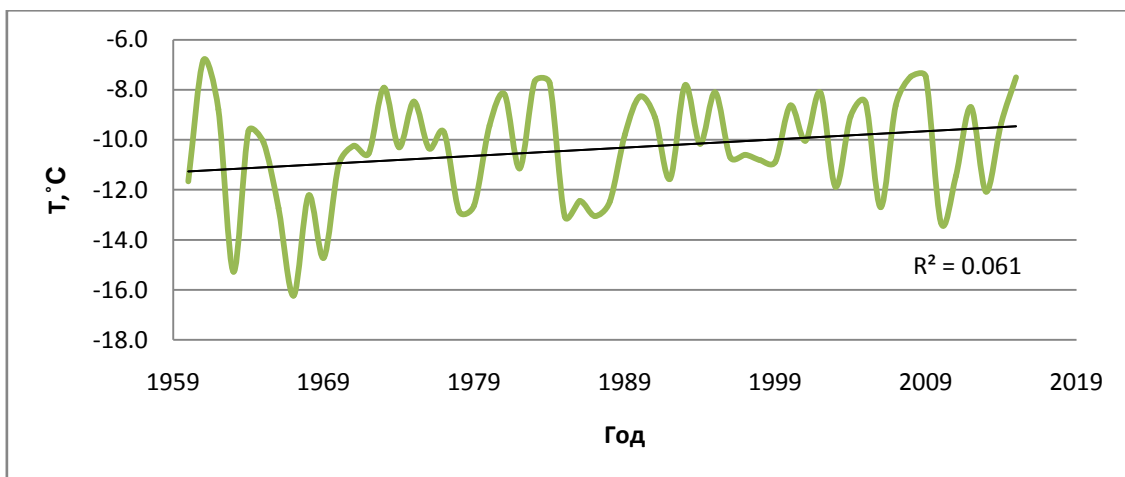


Рисунок 2.2.3 - Среднезимняя температура на метеостанции Великий Устюг

Для зимней температуры за рассматриваемый период характерен статистически незначимый рост.

Изменение температуры воздуха, как говорилось выше, распределено неравномерно по месяцам (табл 3). Для оценки значимости линейных трендов был использован метод оценки значимости коэффициента корреляции. Тренд является статистически значимым при уровне значимости 5%, если $R > 2 \cdot \delta$.

Таблица 2.2.1 - Значимость трендов температуры воздуха за различные периоды

Значимость трендов (зимн)			
Пункт	r	δ	$2 * \delta$
Вологда	0,21	0,12	0,24
Вел.Устюг	0,25	0,13	0,25
Летних			
Вологда	0,38	0,11	0,21
Вел.Устюг	0,40	0,11	0,22
Ноябрь			
Вологда	0,18	0,12	0,24
Вел.Устюг	0,13	0,13	0,26
Март			
Вологда	0,27	0,11	0,23
Вел.Устюг	0,21	0,13	0,26
Годовая			
Вологда	0,46	0,10	0,20
Великий	0,48	0,10	0,21

Из данных таблицы следует, что наиболее значимыми трендами обладают летние месяцы. В связи с ростом температуры растет, годовая влажность воздуха (рис 1.2.7). Это свидетельствует об увеличении нормы годового испарения примерно на 20%, рассчитанной по диаграмме Константинова.

Средняя температура теплого сезона определялась, как среднее значение среднемесячных значений с апреля по октябрь.

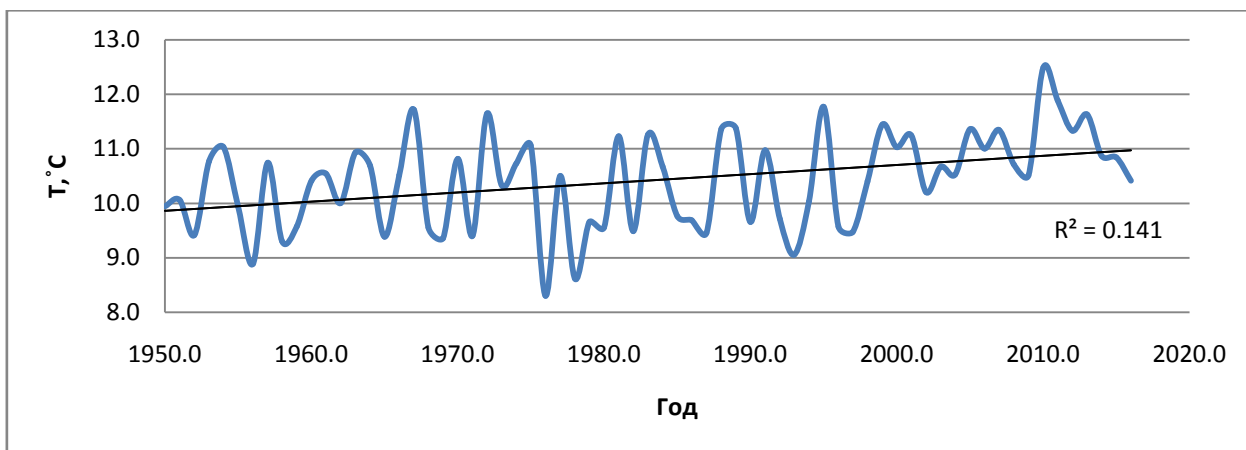


Рисунок 2.2.4 - Средняя температура теплого периода на метеостанции
Вологда

Анализируя изменения абсолютных значений температуры воздуха на метеостанции в Вологде, можно увидеть, насколько увеличились среднемесячные и среднегодовые значения температуры (таблица 2.2.2).

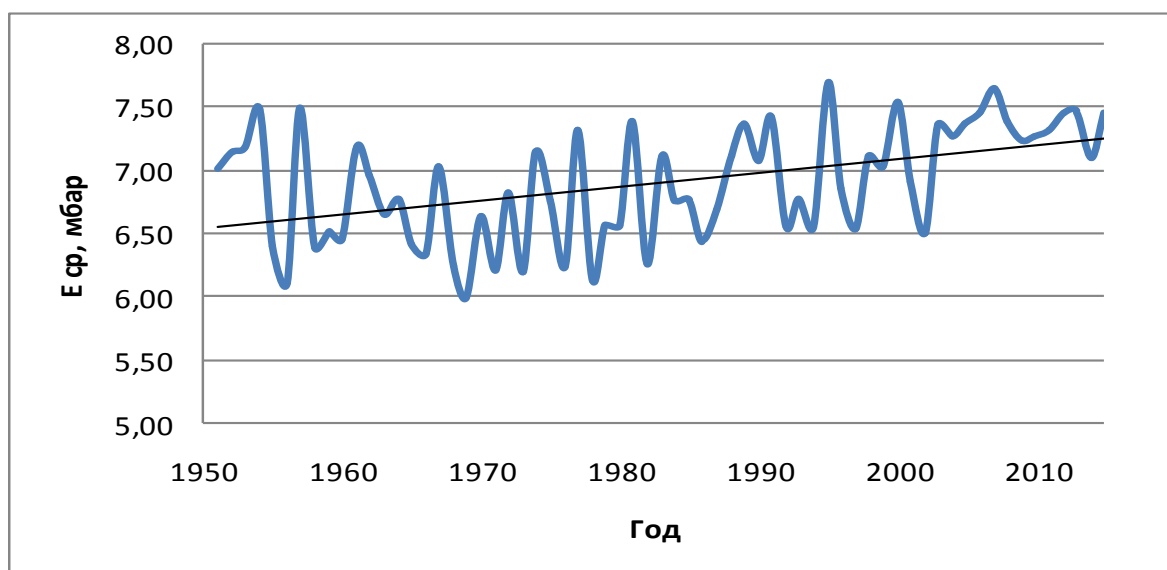


Рисунок 2.2.5: Значение среднегодовой влажности воздуха

Таблица 2.2.2 - Значение среднемесячных и среднегодовой температуры
м.с. Вологда

Месяц	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	Год
Ср.знач. по 1970 год	-11,8	-11,4	-6,4	2,1	9,5	14,4	16,9	14,7	9	2,5	-3,6	-9,2	2,2
Ср.знач. С 1970 -2016 год	-11,05	-9,99	-4,14	3,36	10,68	15,33	17,48	14,75	9,32	3,04	-3,35	-8,05	3,10
Разница	0,75	1,41	2,26	1,26	1,18	0,94	0,58	0,05	0,32	0,54	0,25	1,15	0,90

Из обобщений, представленных в данной таблице, следует, что потепление климата сказалось на всех месяцах. Так, средняя многолетняя температура марта повысилась на 2,3 градуса к 2016 году, по сравнению с данными по 1970. Изменение годовой температуры на 2016 год составило 0,9 градуса Цельсия.

Стоит заметить, что данные изменения происходили и ранее рассматриваемого периода так, например, в климатический оптимум голоцена на территории Северной Евразии происходило повсеместное повышение среднегодовых температур в основном за счет роста зимних температур. Наибольшее повышение температур происходило в северных регионах Северной Евразии, отклонения температур постепенно уменьшались в южном направлении. Отмечалось увеличение среднегодового количества осадков. Во многих районах Северной Евразии уменьшалась годовая амплитуда температур воздуха, то есть климат в оптимум голоцена был менее континентальным. Величина средней продолжительности безморозного периода была выше на всей территории Северной Евразии, больше всего она увеличивалась в северных регионах, постепенно уменьшаясь на юг.

Отмечено, что изменение температурного режима современности сходно с изменениями в оптимум голоцена около 5500 л.н. и с потеплением в суббореальном периоде около 3500 л.н., только имеет меньшую амплитуду. Климаты и ландшафты Северной Евразии в условиях глобального потепления.

Данные изменения обуславливают усложнение зимнего режима рек с существенным повышением зимних меженных расходов воды и перераспределение стока внутри года.

Количество осадков увеличивается внутри года неравномерно. Сумма осадков, выпавших за зимний период, увеличивается. Увеличение же осадков, выпадающих в теплый период, не столь существенно или вовсе отсутствует, что, в целом, хорошо коррелирует с данными палеорекопструкций, и вызывает снижение летне-осеннего стока рек бассейна Северной Двины за счет увеличения испарения. Однако, это справедливо лишь для крупных рек, например: меженные расходы и уровни рек Ема и Юг практически не изменились.

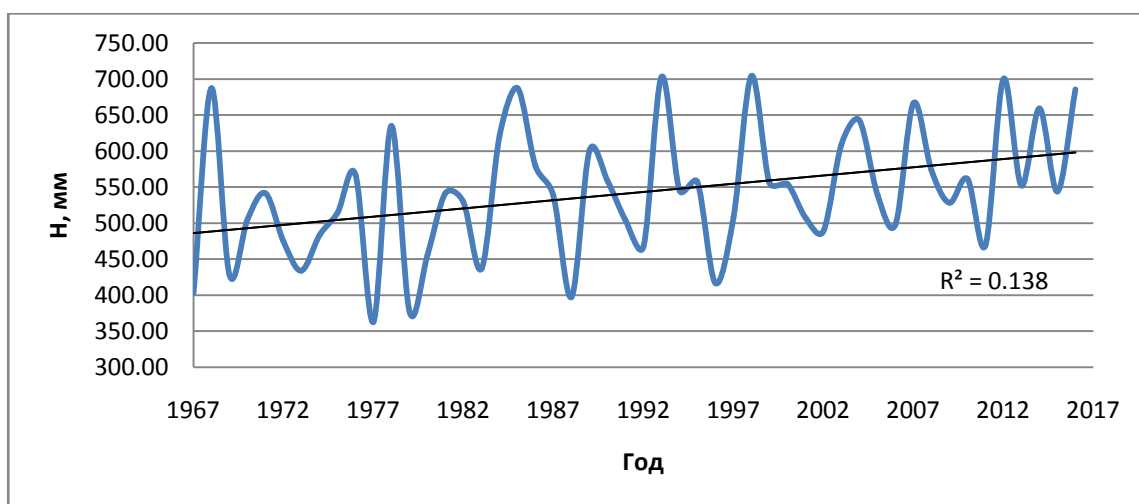


Рисунок 2.2.6: Сумма осадков за гидрологический год на метеостанции Великий Устюг.

Твердые осадки определялись с ноября по март гидрологического года при условии, что температура ноября и марта должна быть меньше -3 градусов Цельсия.

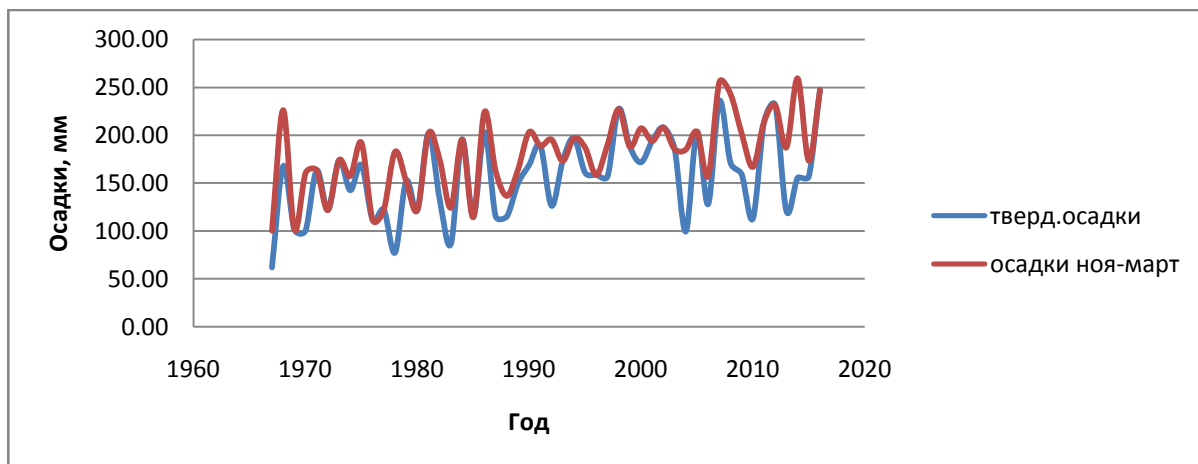


Рисунок 2.2.7: Сумма осадков за ноябрь-март

В последние годы наблюдений доля твердых осадков за зимний период уменьшается. Это подтверждает гипотезу об изменении типа питания рек в зимний период. Увеличение смешанных осадков, позволяет им беспрепятственно стекать в русло, увеличивая меженный сток рек.

Таблица 2.2.3 - Значимость трендов для суммы осадков за различные периоды

Значимость трендов			
Пункт	r	sigma r	Значимость
Вел. Устюг(год)	0,37	0,12	0,25
Вел. Устюг(зимн)	0,46	0,11	0,22
Вел. Устюг(летн)	0,11	0,14	0,28
Вел. Услюг(март)	0,21	0,13	0,27
Вел. Услюг(ноябрь)	0,23	0,13	0,27

Из

данных,

приведенных в таблице, следует, что годовая сумма осадков значительно увеличивается за счет роста суммы осадков, выпавших в зимний период. Увеличение суммы осадков за теплый период не является статистически

значимым, учитывая, существенный рост температуры в летний период можно предположить, что в районе за счет увеличения испарения на 20% можно ожидать дефицит стока рек в летне-осенний период.

Увеличение количества твердых осадков, безусловно, должно увеличить общие снегозапасы, однако наличие зимних оттепелей нивелирует данный процесс и даже приводит к снижению содержания воды в снеге на начало снеготаяния в последние годы (рис 2.2.8). Снегозапасы определены как запас воды в снеге на момент начала снеготаяния.

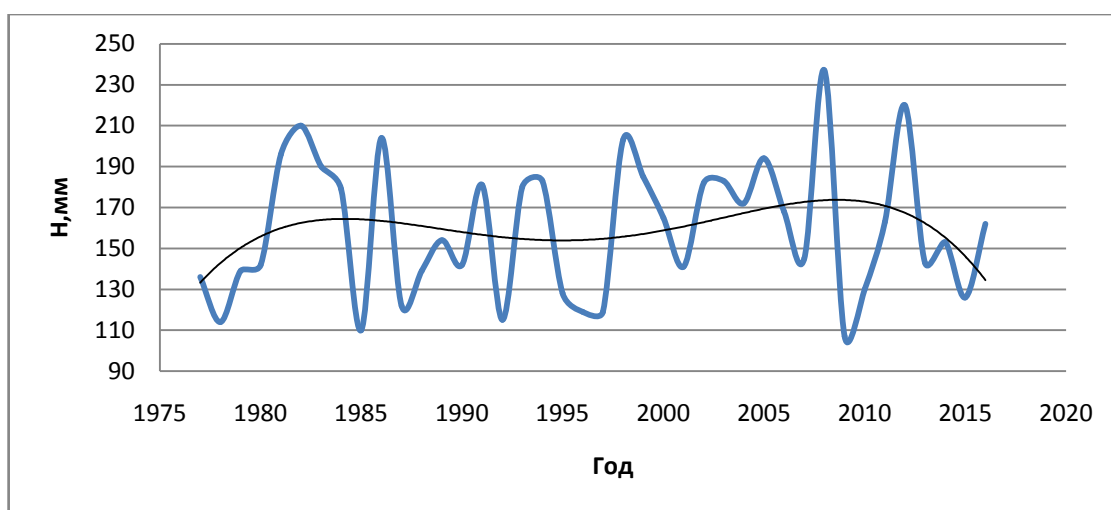


Рисунок 2.2.8 - Хронологический график снегозапасов, выраженных в количестве воды в снеге на начало снеготаяния

Анализируя связи снегозапасов и твердых осадков, можно прийти к выводу о ее непостоянстве, что делает данные, полученные по маршрутным снегосъёмка чрезвычайно ценными. С увеличением температуры холодного периода, связь количества снегозапасов и твердых осадков постепенно убывает: это прекрасно видно на рисунках 2.2.9 и 2.2.10.

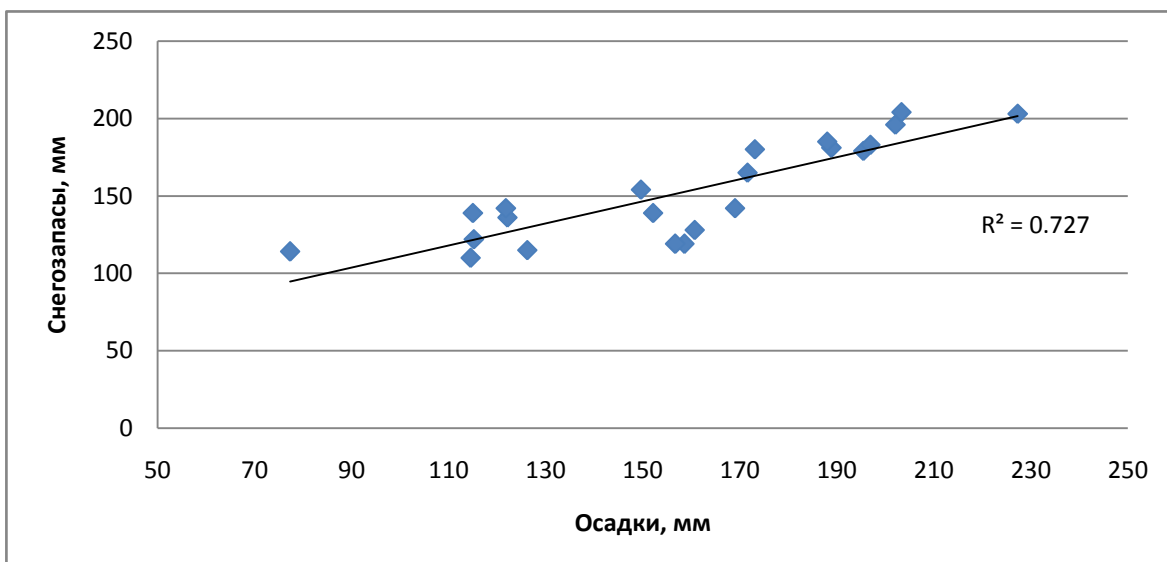


Рисунок 2.2.9 - Связь осадков и снегозапасов на метеостанции Великий Устюг 1977-2000 год

Из данного графика следует наличие хорошей связи между данными величинами.

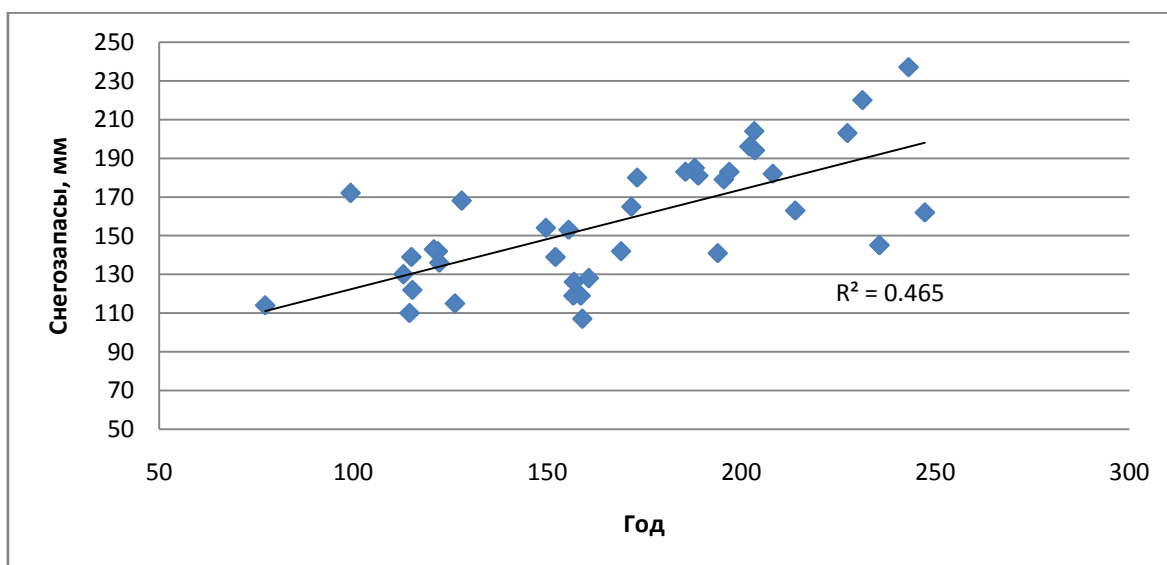


Рисунок 2.2.10 - Связь осадков и снегозапасов на метеостанции Великий Устюг 1977-2016 год

Как видно из приведенных графиков связь данных величин резко снижается в последние годы наблюдений, так для сравнения коэффициент корреляции снизился с 0,85 до 0,68 в последние годы наблюдений. Это связано с появлением оттепелей в зимний период и стаиванием части

снежного покрова, это легко заметить на графике: отскакивающие точки расположены ниже линии тренда, что свидетельствует о недостаточно больших снеготаяниях на начало снеготаяния при данном количестве осадков, выпавших за зимний период. К сожалению, учесть количество снеготаяний, тающих в период оттепелей не представляется возможным на данный момент.

Выполнив комплексный анализ основных метеорологических характеристик, можно прийти к следующим выводам: климат становится менее континентальным за счет увеличения зимних температур. Среднегодовая температура воздуха увеличилась на 0,8-0,9 градуса Цельсия и данный рост является статистически значимым. Увеличение летних температур и испарения окажет большое влияние на межледниковые уровни воды. Однако, привлекая же знания из палеоклиматологии, можно сделать вывод о том, что данные изменения не носят антропогенного характера и связаны с естественными колебаниями в активности солнца, океана и космоса.

ГЛАВА III. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК

3.1ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ

Повышение среднезимних температур отразилось на ледовом режиме рек. Установление устойчивого ледостава сместилось на более поздние сроки, разрушение же ледового покрова происходит раньше обычного, продолжительность ледоставного периода уменьшается (рис 3.1.1).

Можно предполагать, что в результате изменения климата изменяются не только сроки, но и характер ледовых явлений. Всё чаще при потеплении наблюдается процесс замерзания, в ходе которого ледообразование происходит в основном внутри водной массы, доля же льда поверхностного происхождения сокращается. После установление ледостава, зачастую неполного, длительное время сохраняются полыньи, которые являются основным источником шуги. В результате увеличения количества шуги и осенней водности рек в руслах последних все чаще образуются мощные зажоры, которые весной становятся очагами заторов льда.

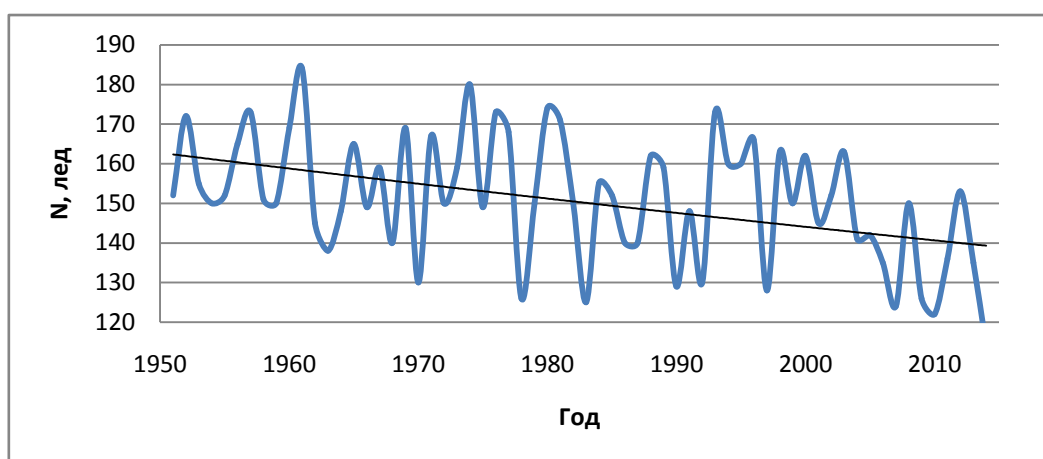
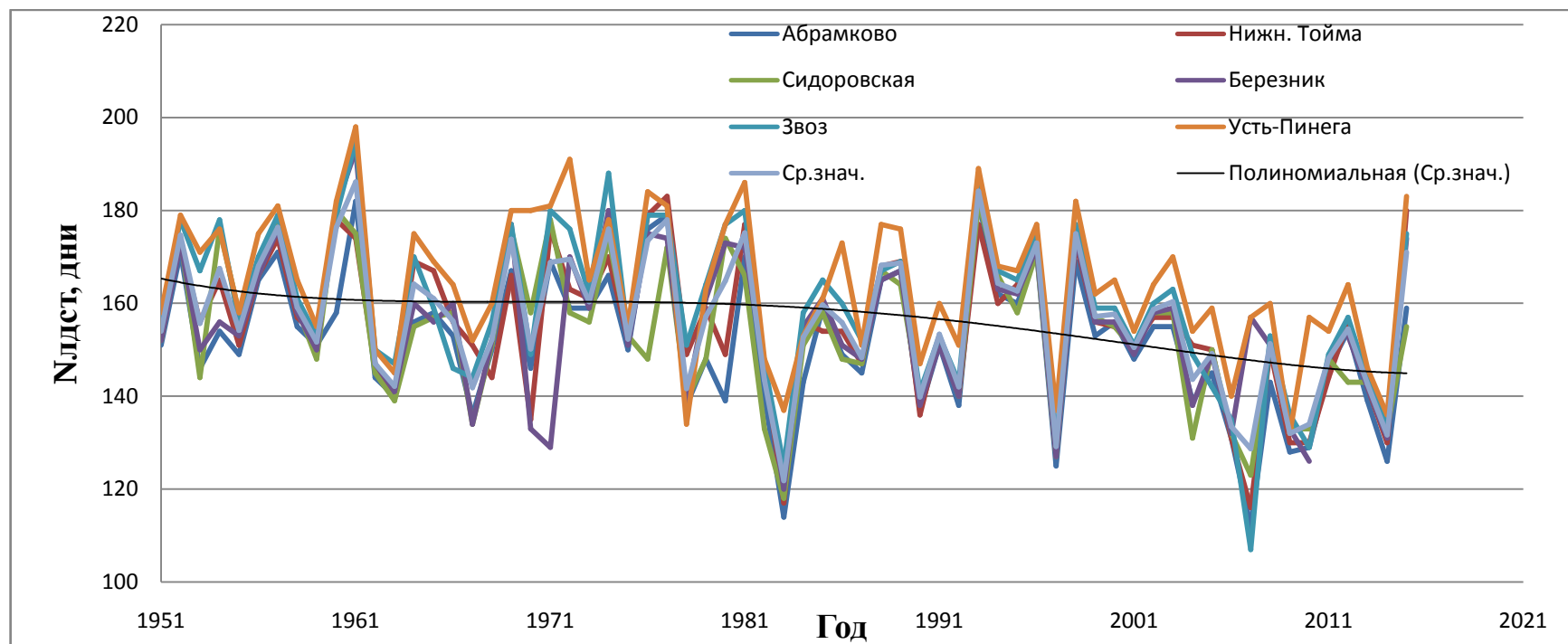


Рисунок 3.1.1 - Продолжительность ледостава Р.Сухона - г.Великий Устюг



3.1.2 - Продолжительность ледостава на Северной Двине

Из данных графиков видно, что по всем постам наблюдений отмечается уменьшение ледоставного периода на 15 дней.

В связи с более поздними сроками замерзания увеличивается количество шугоходов, растет риск зажорных наводнений. На реках Европейской территории России зажоры наблюдались достаточно часто, и потепление климата, с сопутствующими ему: затяжной осенью, частыми зимними оттепелями, осенне-зимними снего-дождевыми паводками и резкими после них похолоданиями, отражаются на большей амплитуде колебаний максимальных уровней в начале ледостава, но их изменение не показывает выраженного тренда.

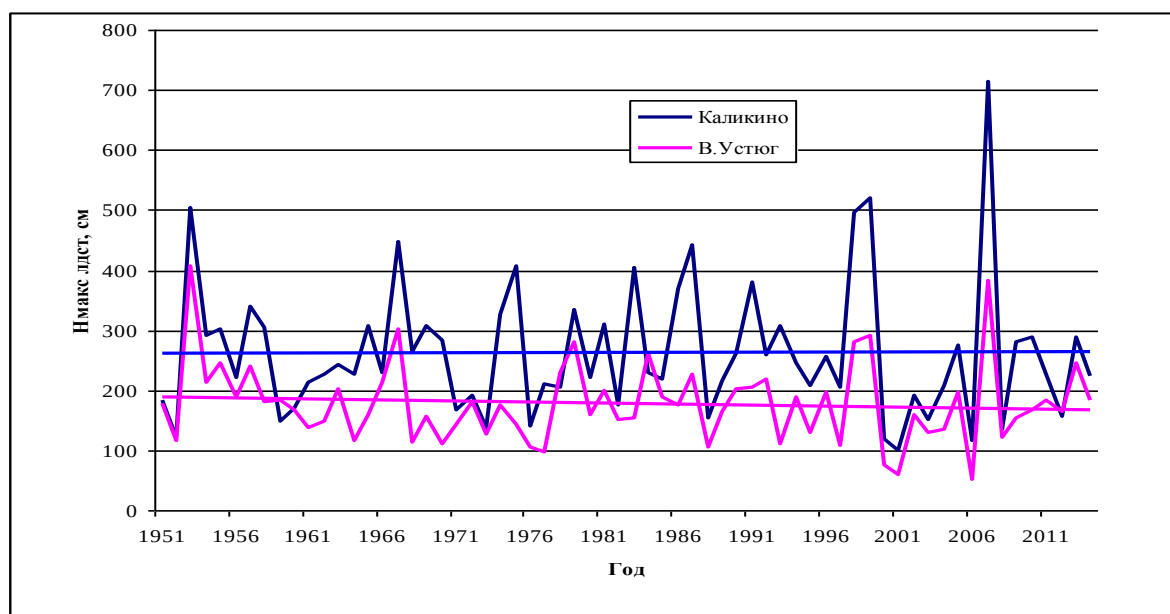


Рисунок 3.1.3 - График многолетних колебаний максимальных уровней в начале ледостава (Нмакс.лдст, см) р. Сухона - д. Каликино и р. Сухона - г. В. Устюг– (1950– 2014 гг)

Максимальная толщина льда снижается во всех пунктах наблюдений (Рис 3.1.4). Данное снижение является статистически значимым и составляет 25-30 см. Максимальная толщина льда является важным предиктором при прогнозировании максимальных заторных уровней весеннего половодья. При ее сокращении максимальные уровни, обусловленные процессами заторообразования, должны сокращаться. Однако, в связи ростом меженных уровней этого не происходит.

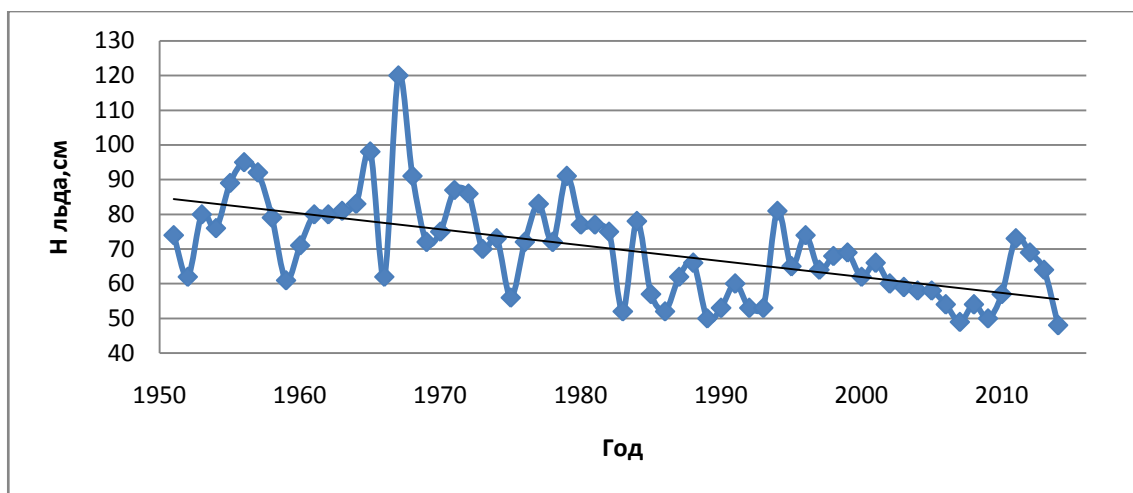


Рисунок 3.1.4 - Многолетние изменение и тренд максимальной за зиму толщины ледяного покрова Сухоны у Великого Устюга

В более ранних исследованиях выявилось, что с начала 80-х годов прошлого века климатический фактор приводит к изменению детерминированных вкладов отдельных факторов в формирование максимальных заторных уровней воды северных рек России.

Если до 70-х годов 20 века формирование максимального заторного уровня определялось условиями вскрытия рек, то начиная с 70 годов, все большую роль имеет зашугованность речного русла. Таким образом, в последние десятилетия происходят разноплановые климатические изменения, меняющие условия формирования весеннего половодья, но при этом не оказывают значительного влияния на повторяемость и масштаб

заторных наводнений, которые, по-прежнему определяются естественной циклоничностью природных явлений.

3.2 ВОДНЫЙ РЕЖИМ РЕК

Знание о гидрологическом режиме рек является основополагающим при проектировании различных гидрологических сооружений, планировании водохозяйственной деятельности региона. В условиях изменяющегося климата эта нужда возрастает многократно.

Естественно, изменения, произошедшие в климате, сказались на гидрологическом режиме рек. Данные изменения, как и в случае с климатом, не носят какой-либо определенный характер. И связаны, скорее, с перераспределением стока внутри года. Так, в связи с более затяжной осенью и более мягкой зимой повышаются уровни зимней и осенней межени. Но потепление климата, также оказывают свое влияние и на вскрытие, и на половодье, которое происходит более дружно и в короткие сроки. Что так же вносит свой вклад в падение уровней летней межени, что, в целом, носит негативный характер. Объемы же стока весеннего половодья и года в целом практически не изменились, что свидетельствует о сохранении и поддержании водного баланса. Затопы льда, которые стали огромной проблемой данного региона, так же не показывают выраженных тенденций, по той причине, что изменились вклады отдельных факторов, влияющих на максимальные заторные уровни. Так, можно утверждать, что с ростом зажонных уровней должен увеличиваться максимальный заторный уровень. Да, это так и 2016 год тому подтверждение, когда Великий Устюг пострадал от небывалого по своей катастрофичности наводнения. Однако, подобные события происходят довольно редко и в 2016 году имело место влияние различных факторов, решающим из которых стал крайне высокий уровень в начале ледостава. Тем не менее, на мощность заторных образований немалое влияние оказывает максимальная толщина льда, которая в последние годы

наблюдений значительно уменьшилась, что собственно и объясняет отсутствие выраженных трендов к росту максимальных заторных уровней.

В целом, водность Северной Двины снижается (рис 3.2.1). Водность Северной Двины оценена как среднее значение между модулями стока всех пунктов Северной Двины. Для оценки водности был использован метод квантильного анализа, суть которого заключается в нахождении статистических характеристик ряда.

При квантильном анализе выборочной совокупности, кроме Me , $x_{0,25}$, $x_{0,75}$ наиболее часто используют крайние члены x_{min} , x_{max} ранжированного ряда, равные x_1 и x_n соответственно, а также их линейные комбинации: интерквартильное расстояние $Q = x_{0,75} - x_{0,25}$, размах $R = x_{max} - x_{min}$ трехсреднее значение

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

Кроме того, различия между T_3 и Me , а также (x_{min}, Me) , (x_{max}, Me) , $(x_{0,25}, Me)$, $(x_{0,75}, Me)$ являются оценками асимметрии As распределения в разных точках области значений переменной x_i , поскольку

$$As = \frac{x_{1-p} + x_p - 2Me}{x_{1-p} - x_p}.$$

Статистики T_3 и Me имеют смысл оценок центра распределения.

Чертеж может быть дополнен «барьерами», которые вводятся через масштаб распределения, записанный в виде $m = 1,5Q$ и получивший название «шаг».

Внутренние барьеры находятся на расстоянии шага от верхней и нижней сторон ящика, наружные барьеры — на шаг дальше. Для случайной величины с нормальным законом распределения между внутренними барьерами содержится 99 % значений выборки, между внешними 99,9997 %. За внешними барьерами расположены «отскакивающие» значения.

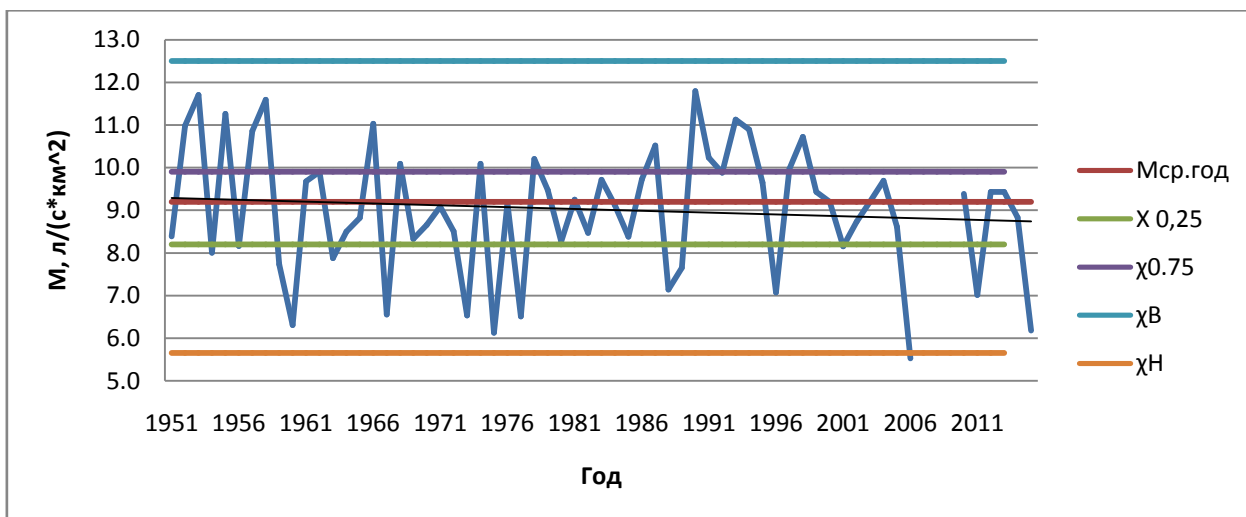


Рисунок 3.2.1- среднегодовой модуль стока Северной Двины и результаты квантильного анализа

Анализируя данный график, можно проследить изменение водности Северной Двины. Снижение уровня водности не является статистически значимым, а данный ряд является однородным по среднему значению и дисперсии. Тем не менее, можно выделить квазистационарные периоды повышенной или пониженной водности, а также периоды средней водности. С начала наблюдений до 1969 года наблюдался период повышенной водности, за ним следует период, в целом, средний по водности, с 1988 года водность реки повышалась, в 2000 начался период пониженной водности, который достиг экстремальных отметок в 2006 году.

Таблица 3.2.1 - таблица квантилей среднегодового модуля стока Северной Двины

Х-ка	$\chi_{\min}$	$\chi_{0.25}$	$\chi_{0.5}$	$\chi_{0.75}$	$\chi_{\max}$	R	Q	T^*	χ_B	χ_H	m	СКО	$0.74Q$
М	5,5	8,2	9,2	9,9	11,8	6,3	1,7	9	12,45	5,65	9,0	1,5	1,3

Данные представленные в данной таблице представляют собой квантили, а также барьеры. Так как величина $0,74Q$ приближается к СКО и среднего значения к $\chi_{0.5}$ можно говорить о распределении близком к нормальному.

Величина среднегодовых значений уровней и расходов не имеет ярко выраженных трендов, что освидетельствует в целом о стационарности гидрологических рядов.

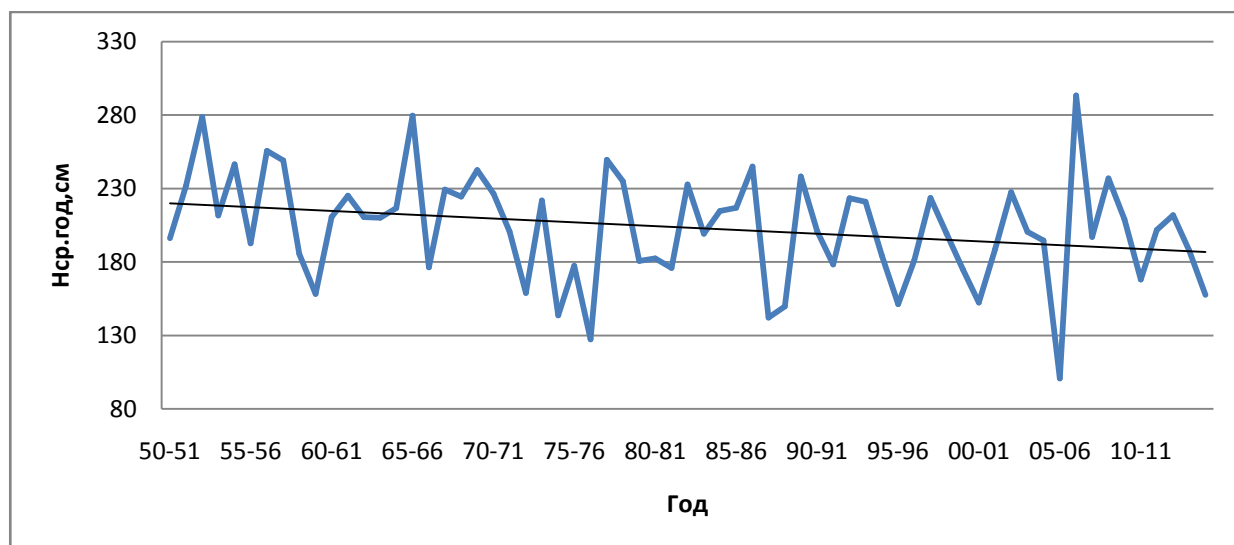


Рисунок 3.2.2 - Среднегодовой уровень р. Северная Двина-Абрамково

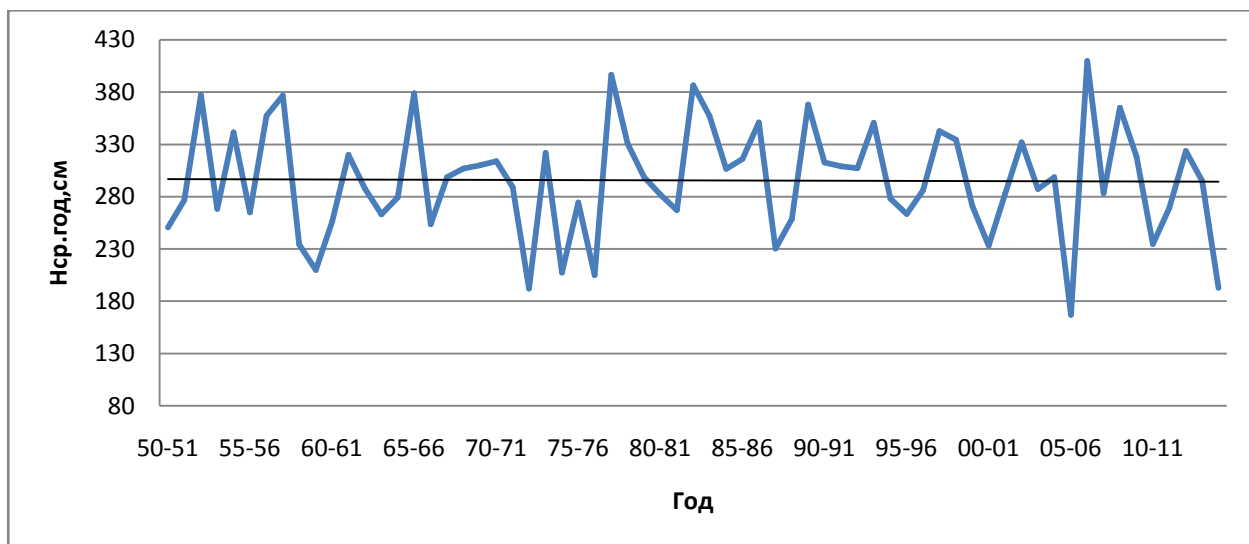


Рисунок 3.2.3 Среднегодовой уровень р. Северная Двина- Звоз

Незначительное снижение среднегодовых уровней воды происходит преимущественно за счет статистически значимого падения летне-осенних уровней (рис 3.2.4).

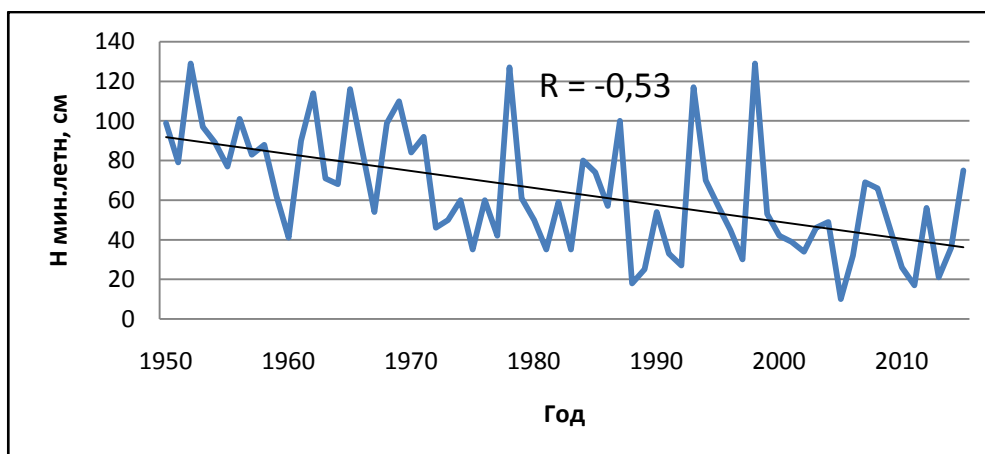


Рисунок 3.2.4 Значение минимальных уровней летней межени Северная Двина – д.Абрамково

3.3 ЛЕДОХОДНЫЕ УРОВНИ

При рассмотрении уровненного режима, в связи с достаточно обширным бассейном и разными механизмами формирования, как и существенно различными проблемами следует разделить данный бассейн на две части, где первой рассматриваемой частью будут притоки Северной Двины: Сухона, Юг, Ема с замыкающим створом на р. Малой Северной Двине - Медведки. Вторым рассматриваемым участком является участок реки от Усть-Курье до Усть-Пинеги.

Для первого участка характерны значительные колебания уровня воды в первую очередь связанные с заторами льда в городе Великий Устюг. Уровненный же режим малых рек не подвергается серьезным колебаниям и опасным гидрологическим явлениям, так на реках Юг и Ема не отмечено значительных просадок летних уровней. Изучая данный участок, следует особое внимание уделить максимальным уровням при весеннем ледоходе, так как именно они являются максимальными в году и могут представлять серьезную опасность.

Для второго участка, так же характерны заторы льда, однако здесь они не наносят значительного вреда. Изменения уровненного режима, в целом, носят аналогичный характер.

Таблица 3.3.1- Проверка на однородность гидрологических рядов максимальных ледоходных уровней

Река-Пункт	Расчетные периоды		Статистические характеристики					
			Критерий Стьюдента t _α =2,004		St	Критерий Фишера F _α =2,136		
						СКО		F
	1	2	1	2		1	2	
Сухо́на-Тотьма	1951-1982	1983-2014	500	469	1,1	104	134	1,6
Сухо́на-Каликино	1951-1983	1983-2014	644	596	1,2	140	165	1,4
Сухо́на-Вел. Устюг	1951-1983	1983-2013	603	607	0,1	144	159	1,2
Ема-Новое	1951-1983	1983-2014	232	209	2,1	39	50	1,6
Юг-Кичм. городок	1951-1983	1983-2014	501	436	2,2	111	123	1,2
Сев. Двина-Медведки	1951-1983	1983-2014	583	535	1,9	91	88	1,1

Как видно из приведенных данных все ряды однородны по дисперсии, однако реки и Юг и Ема не однородны по математическому ожиданию.

Для более точной проверки была оценена значимость линейных трендов, как для отдельных частей гидрологического ряда, так и за весь период наблюдений результаты проверки представлены в таблице.

Таблица 3.3.2 - Значимость линейных трендов

Проверка значимости треда						
Пункт	Медведки	Тотьма	Каликино	Великий	Ема	Юг-Кичм.гор
r(1)	-0,50	-0,58	-0,31	-0,17	-0,47	-0,41
r(2)	0,21	0,004	-0,05	-0,11	0,40	0,19
r(all)	-0,29	-0,23	-0,22	-0,06	-0,21	-0,28
сигма r(1)	0,15	0,12	0,16	0,17	0,14	0,15
сигма r(2)	0,20	0,18	0,18	0,18	0,15	0,17
Сигма r(all)	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Значимость 1	значим	значим	незначим	незначим	значим	значим
Значимость 2	незначим	незначим	незначим	незначим	значим	незначим
Значимость all	значим	незначим	незначим	незначим	незначим	значим

Как видно из данных, приведенных в таблице, ни одна река не обладает значимым трендом за весь период наблюдения.

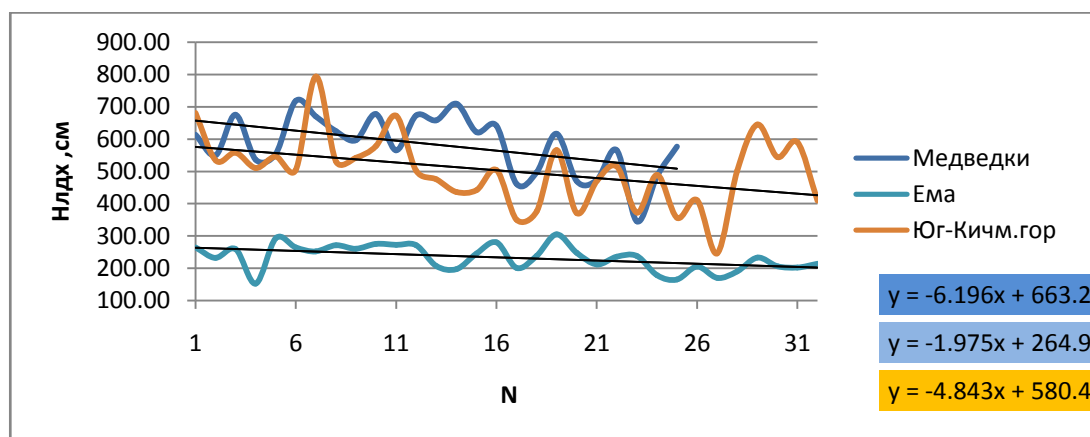


Рисунок 3.3.1 - Хронологический график хода максимальных ледоходных уровней за 1950-1981 год

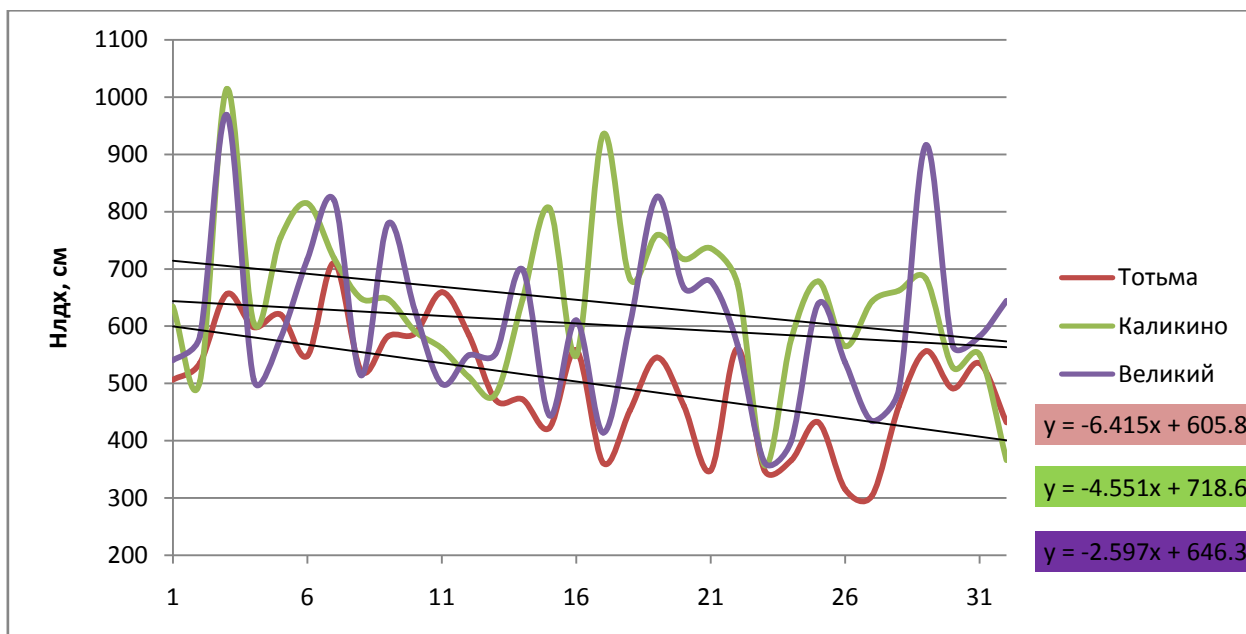


Рисунок 3.3.3 - Хронологический график хода максимальных ледоходных уровней за 1950-1981 год

На представленных графиках наглядно представлена разница между беззаторными и заторными реками, коей является Сухона. При тех же трендах река Сухона обладает огромной амплитудой максимальных ледоходных уровней, вызванной заторными явлениями, повторяющимися регулярно.

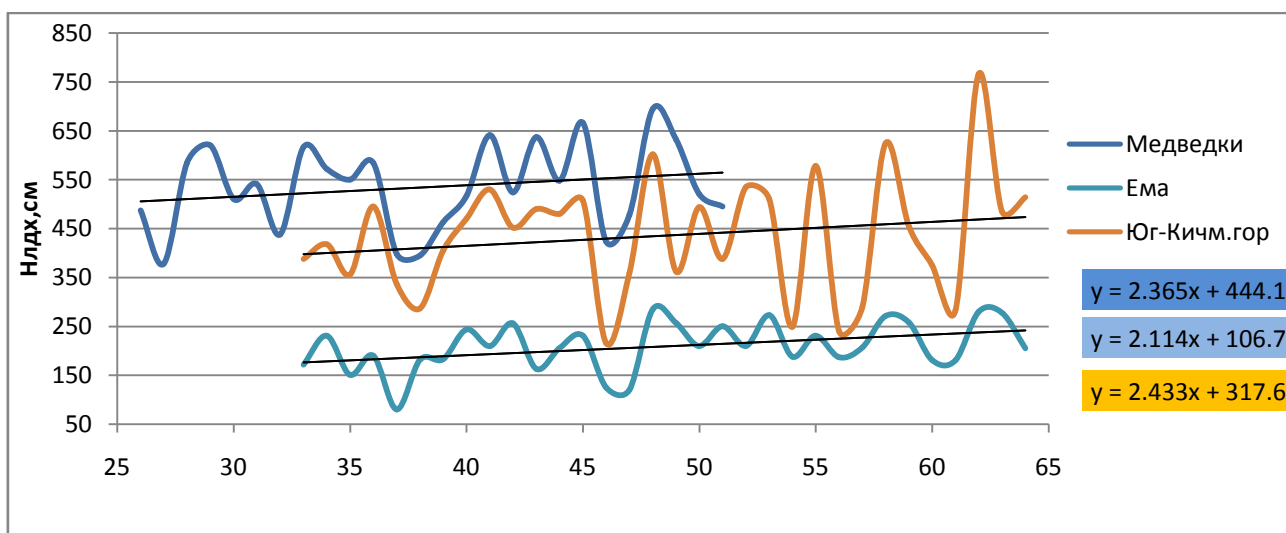


Рисунок 3.3.4 Хронологический график хода максимальных ледоходных уровней за 1981-2014 год

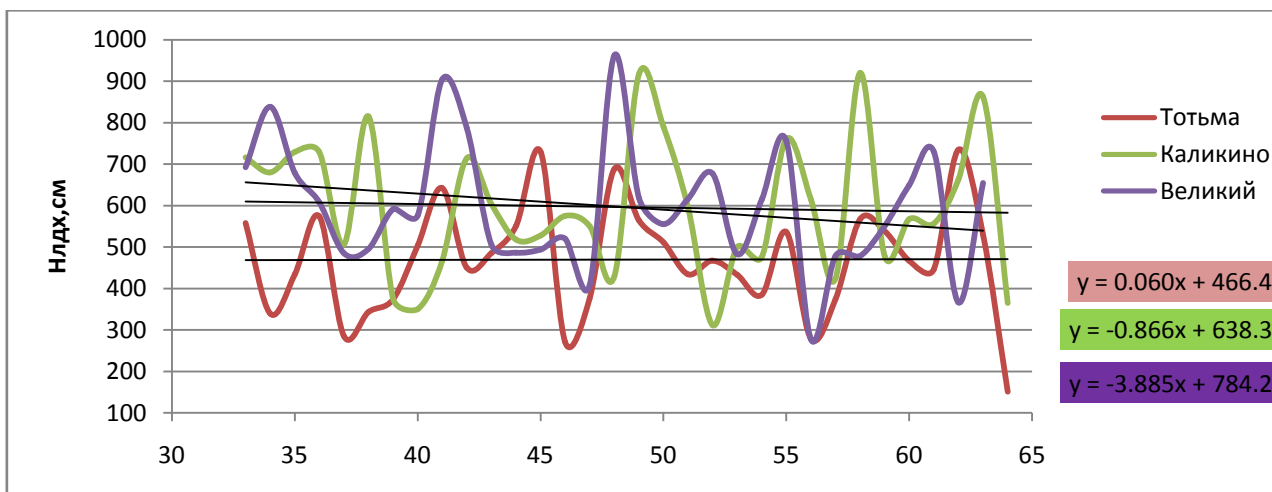


Рисунок 3.3.5 Хронологический график хода максимальных ледоходных уровней за 1981-2014 год

Из полученной информации следует, что тренд первого периода нивелирует тренд второго, что дает право считать ряды однородными.

Река Сухона, является крупным притоком Северной Двины и обладает одинаковыми тенденциями с главной рекой.

Ниже представлен график максимальных осредненных уровней за различные периоды для р. Северная Двина в замыкающем створе.

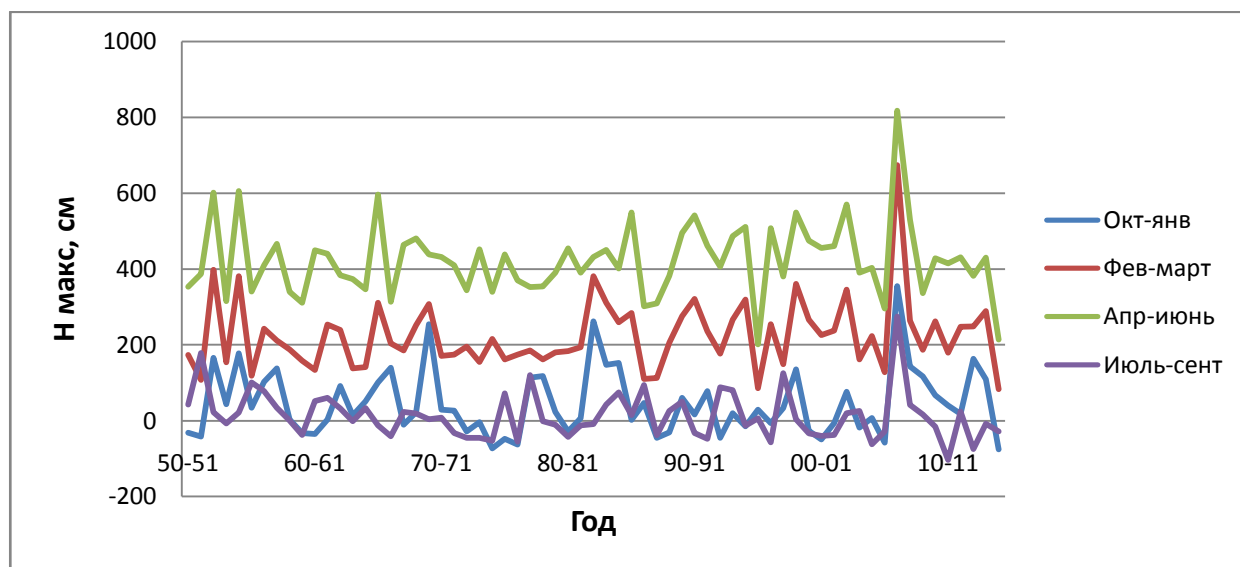


Рисунок 3.3.6 Средний максимальный уровень за различные периоды Северная Двина - Усть Пинега

Из анализа данного графика так же следует, что более всего снижаются максимальные уровни летне-осенней межени. Также, если с 1990-2000 годов уровни меженей примерно совпадали, то начиная с 2000 годов, зимние меженные уровни значительно превысили летние. Также можно отметить хорошую связь между всеми величинами, которая подтверждается данным графиком.

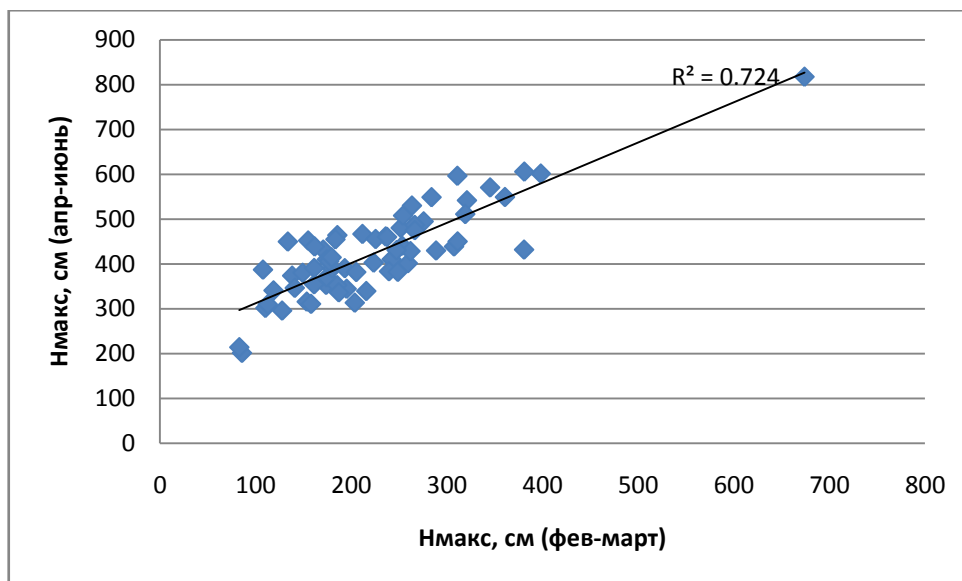


Рисунок 3.3.7 - График связи максимальных осредненных уровней за период февраль-март и апрель-июнь

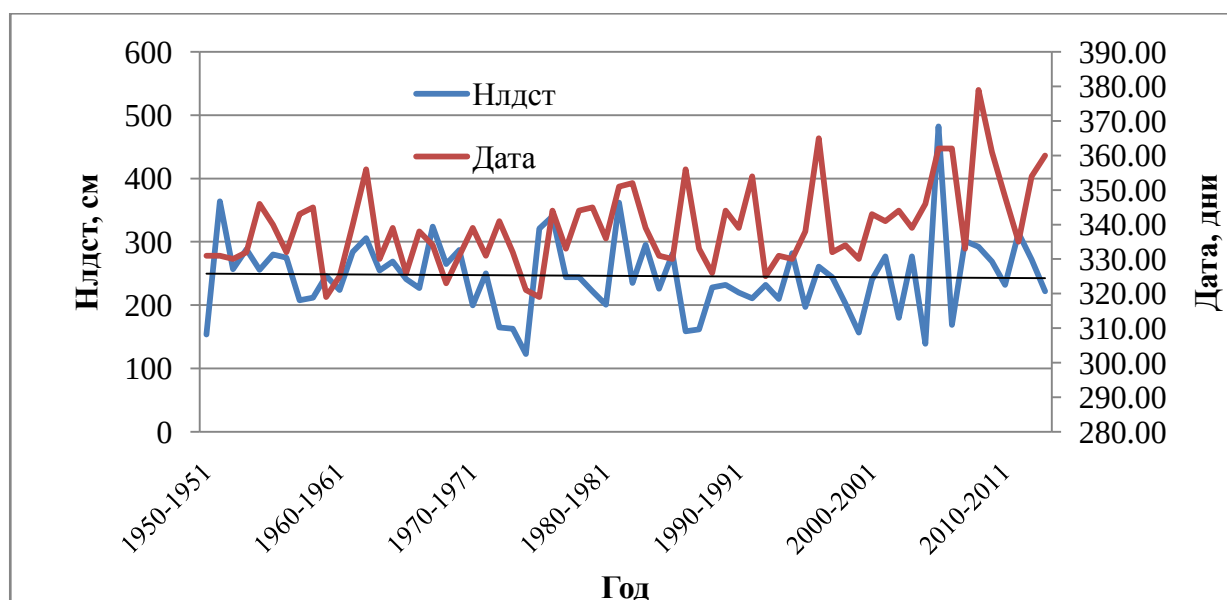


Рисунок 3.3.8 Максимальные уровни в начале ледостава и даты их наступления р. Северная Двина-Абрамково

На данном графике изображено изменение дат и значений максимального уровня в начале ледостава. Даты выражены в количестве дней от начала года. Их смещение на более поздние сроки связано с потеплением климата и как следствие со смещением всех дат ледовых явлений. Нисходящий тренд, представленный на данном графике, не является значимым и не может оказывать сильное влияние на формирование ледоходных уровней.

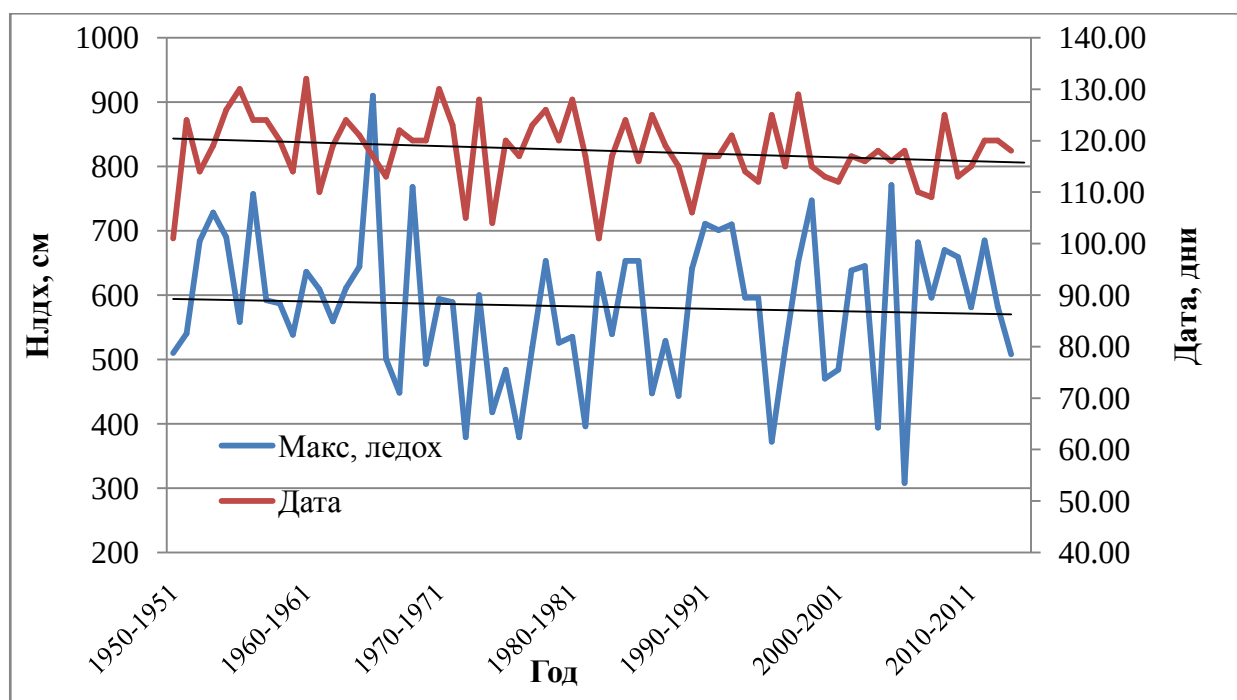


Рисунок 3.3.9 - Максимальные уровни весеннего ледохода и даты их наступления р. Северная Двина-Абрамково

Уровни весеннего ледохода снижаются, что связано в основном с наличием оттепелей в зимний период.

Наблюдение за уровнем режимом дают бесценные знания. Изучая бассейн Северной Двины можно сделать следующие выводы: на всех участках Северной Двины, в целом, отмечается схожие тенденции, которые, тем не менее, не являются статистически значимыми. Главной же особенностью уровня режима бассейна Северной Двины является влияние на него заторов льда во время весеннего ледохода.

ГЛАВА IV. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТОКА

4.1 МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Прогнозирование — это предвидение (предсказание), которое предполагает состояние или описание возможных или желательных аспектов, состояний, решений, проблем будущего. Прогноз — это результат процесса прогнозирования, выраженный в словесной, математической, графической или другой форме суждения о возможном состоянии объекта и его среды в будущий период времени. В самом общем виде методы прогнозирования делятся на формализованные и экспертные (количественные и качественные).

Качественные методы прогнозирования — субъективны, основаны на мнении и суждении потребителей, экспертов. Качественные методы подходят тогда, когда отсутствуют исторические данные. Данные методы применяются, как правило, для среднесрочных и долгосрочных решений. Примерами качественных методов прогнозирования являются исследование рынка, метод Делфи, историческая аналогия жизненного цикла и т.д.

Количественные модели прогнозирования используются для прогнозирования будущих данных в виде функции от исторических данных. Они подходят для использования, когда исторические числовые данные доступны и когда ожидается сохранение динамики данных в будущем. Эти методы, как правило, применяются для краткосрочного и среднесрочного прогнозирования. Примерами количественных методов прогнозирования являются: скользящие средние, экспоненциальное сглаживание, мультипликативные сезонные индексы и т.д.

В данной работе для оценки количественных изменений системы применены формализованные методы прогнозирования. Экспертные методы использованы для оценки качественных изменений.

Формализованные методы прогнозирования так же делятся на много подгрупп. Самый простыми из них являются «метод средних» и «наивный подход», в гидрологии известный как «природный». Для метода средних подразумевается, что все будущие значения будут равны среднему многолетнему, а для наивного подхода, последнему значению. В гидрологии два этих метода используются для оценки качества других прогностических моделей.

Для прогнозирования временных рядов используются следующие методы

- Moving average (Скользящее среднее);
- Weighted moving average (Взвешенная скользящая средняя);
- Kalman filtering (фильтр Калмана);
- Exponential smoothing (Экспоненциальное сглаживание);
- Autoregressive moving average (ARMA) — Авторегрессия скользящего среднего;
- Autoregressive integrated moving average (ARIMA) e.g. Box-Jenkins — интегрированная модель авторегрессии скользящего среднего, например, модель Бокса—Дженкинса;
- Extrapolation (Экстраполяция);
- Linear prediction (Линейное прогнозирование);
- Trend estimation (Оценка тренда);
- Growth curve (statistics) — Кривая роста (статистические данные).

Так же для всех видов прогнозирования могут быть применены методы искусственного интеллекта

- Искусственные нейронные сети
- Групповые методы обработки данных
- Метод опорных векторов

Методики оценки качества прогнозов

Оценка прогноза преследует две цели:

- Установить степень точности и эффективность методики прогнозирования;
- Определить степень удачности прогноза или их совокупности после осуществления предсказанного явления.
-

Главным критерием, который должна удовлетворять оценка качества методики и оправдываемости прогнозов, является объективность и их сопоставимость для различных гидрологических объектов.

В данной работе применялся метод ГМЦ для оценки отдельных прогнозов и их совокупности, а так же метод Нэша-Сатклифа.

В методе ГМЦ в качестве числовой оценки эффективности методов прогнозирования используется отношение средней квадратичной ошибки проверочных прогнозов к среднему квадратичному отклонению предсказываемой величины от нормы $\frac{s}{\sigma}$. Приемлемыми для выпуска прогнозов принято считать методы, для которых данное соотношение не превышает 0,8. В ряде случаев данное соотношение может быть больше единицы, за счет условий малой обеспеченности, появление которых невозможно учесть в рамках используемой модели. В подобных случаях метод прогноза является приемлемым, если вероятность подобных ошибок меньше 25%.

В качестве критерия оправдываемости каждого отдельного прогноза или их совокупности служит допустимая ошибка $\delta_{\text{доп}}$. Оправдавшимися являются прогнозы, ошибка которых меньше или равна $\delta_{\text{доп}}$. Величина допустимой ошибки, строго говоря, может быть назначена из различных соображений. В соответствии с Наставлением по службе прогнозов за допустимую ошибку краткосрочных прогнозов принимается вероятное изменение предсказываемой величины за период заблаговременности

прогноза $\Delta_{\text{доп}} = 0,674 * \sigma_{\Delta}$, а для долгосрочных прогнозов – вероятное ее отклонение от нормы $\Delta_{\text{доп}} = 0,674 * \sigma$.

Оправдываемость совокупности прогнозов вычисляется как отношение числа оправдавшихся прогнозов к общему их числу и выражается в процентах.

Основным недостатком данной методики является то, что относительная величина допустимой ошибки оказывается различной при разных значениях предсказываемой переменной.

Коэффициент Нэша-Сатклиффа варьируется от минус бесконечности до 1 и характеризует степень превосходства прогнозов, данных с использованием модели, над прогнозами, данными по среднему значению. Рассчитывается коэффициент Нэша-Сатклиффа по формуле:

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \overline{Q_o})^2}$$

Таким образом, коэффициент Нэша-Сатклиффа является отношением суммы квадратов ошибок прогноза к сумме квадратов ошибок прогнозов, данных по среднему значению, и по физическому смыслу ничем не отличается от величины $\frac{S}{\sigma}$. В идеальном случае, дробь обращается в 0, а коэффициент Нэша-Сатклиффа равен 1. Если же модель прогнозирует не лучше среднего значения, коэффициент Нэша-Сатклиффа равен 0.

Зная особенность нейронных сетей вместо прогноза выдавать среднее значение, коэффициент Нэша-Сатклифа является идеальным методом проверки нейронных сетей.

4.2 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ ЛЕДОХОДНЫХ УРОВНЕЙ

Заторные явления - неотъемлемая составная часть процесса вскрытия Сухоны, Юга и Малой Северной Двины. Большой объем льда в речных руслах, значительные скорости течения воды (0,6 м/с и более), множество русловых препятствий для движения льдин в виде излучин, перекатов, островов – все это создает достаточные условия для образования мощных скоплений льда при вскрытии этих рек.

Замерзание Сухоны обычно начинается в конце октября, а Юга и Малой Северной Двины – в первой декаде ноября. Продолжительность осеннего ледохода (шугохода) колеблется от 1-5 до 30-40 дней и более. Наибольшая его продолжительность (50-60 дней и более) характерна для низовьев Сухоны и Малой Северной Двины. Осенний ледоход на Сухоне происходит обычно с 30 октября по 5 ноября.

Для этих рек, как и для большинства рек Севера и Северо-Запада ЕТР, характерны осенние зажоры, с толщиной скопления шуги и раздробленного льда до двух-четырех метров. Размыв шуги водным потоком и таянием ее под воздействием теплового потока от дна, уменьшает шуговой слой к началу вскрытия реки. Интенсивность этого процесса зависит от удельного расхода воды подо льдом и суровости зимы и может достигать 5-10 см/сутки. Но чаще всего ко дню вскрытия в руслах рек этих регионов сохраняется значительное количество шуги. Весной у верхней границы зажоров образуются мощные заторы льда.

Максимальные уровни воды у г. Великого Устюга зависят от расположения заторов относительно узла слияния Сухоны и Юга. Заторы образуются в пределах многочисленных перекатов и в самом узле слияния рек. Их местоположение изменяется от года к году. Чем дальше от Великого Устюга находится голова затора и больше его мощность, тем больше вклад заторной составляющей в изменение максимальных уровней в устье Сухоны.

Наивысший уровень воды наблюдался при заторе льда 19 апреля 1953 года. Он составил 969 см над «0» графика гидрологического поста.

Пойма Сухоны в районе г. Великого Устюга затопляется полностью при уровне 936 см над нулем «0» поста. Выдающиеся весенние наводнения отмечались в Великом Устюге в: 1761, 1807, 1817, 1872, 1903, 1914, 1917, 1936, 1939 годах.

Уровни воды Сухоны у г. Великий Устюг поднимаются на 8 м над уровнем воды зимней межени (57,7 м БС) в среднем 1 раз в 10 лет, на 7 м – 1 раз в 7 лет. Продолжительность затопления поймы и низкой надпойменной террасы затопления незначительна – 1-4 дня.

Затопление городской территории, расположенной на высокой пойме, начинается, если заторный уровень превысит меженный зимний на 5 - 6,5 м. Наибольшие бедствия приносят подъемы воды выше 7,5 м. При подъеме воды в Сухоне на 8 м (1 раз в 11 лет, продолжительность – 1-2 дня) затопливается почти вся южная часть города.

В 1998 г. были затоплены город Великий Устюг и 24 населённых пункта с общей численностью населения 38960 человек. Пострадало 8 тысяч человек. Общий ущерб составил 300 млн. руб в ценах 1998 года.

В 2016г. время стояния затора в г. Великий Устюг и населенных пунктах вокруг него было затоплено 22 населенных пункта, почти 3 тысячи придомовых территории с населением 7,5 тысяч человек. Предварительный материальный ущерб, по оценке правительства Вологодской области, составил до 533,1 млн. руб.

Методики прогнозов максимальных заторных уровней

Существует великое множество различных методик для прогнозирования максимальных уровней весеннего ледохода. Большинство и лучшие из них разработаны в Государственном Гидрологическом Институте под руководством Бузина В.А. Данные методики основываются на различных регрессионных уравнениях, в которых основными предикторами являются: максимальный уровень при ледоставе, максимальная толщина льда, температура воздуха, а так же порядок вскрытия рек. Особое внимание следует обратить на максимальный заторный уровень при ледоставе, данный уровень является уровнем после образования устойчивого ледового покрова и отмечается, как правило, в первые дни ледостава. Являясь комплексной характеристикой зашугованности русла в начале ледостава, именно данный предиктор становится чрезвычайно актуальным в последнее время. Однако, есть некоторая неоднозначность в его определении, связанная с тем, что на больших водосборах данный уровень может наблюдаться и спустя месяц, в то время как в первые дни ледостава может отмечаться локальный максимум. Тем не менее, связи и коэффициент парной корреляции между данным уровнем и уровнем весеннего ледохода достаточно велики и достигают 0,5, что, в принципе, достаточно для долгосрочного прогнозирования.

К настоящему времени разработаны три методики прогнозов максимальных заторных уровней воды для р. Сухона. Первая составлена для участков у д. Каликино и г. Великий Устюг в Государственном гидрологическом институте (ГГИ) в 1994 г., со средней заблаговременностью 7 суток. Вторая - в 2002 г. в МГУ для г. Великий Устюг, со средней заблаговременностью 2 суток.

Третья методика разработана также в ГГИ в 2014 г. В ней учтены основные показатели процесса заторообразования и данные наблюдений по 2010 год. При ее разработке использованы результаты гидравлического моделирования, выполненные в русловой лаборатории института.

Для краткосрочного прогноза максимальных заторных уровней у г. Великий Устюг были выбраны наиболее информативные показатели, по которым составлены следующие уравнения:

1) на дату выпуска прогноза вскрылись Сухона у Тотьмы и Юг у Кичменгского Городка

$$H_{\text{макс}} = 43 + 1,36 H_{\text{Тотьма}} + 0,319 H_{\text{К. Городок}}$$

2) на дату выпуска прогноза вскрылась только Сухона у Тотьмы

$$H_{\text{макс}} = -257 + 0,478 t_{\text{л, макс}} + 0,841 H_{\text{лдст}} + 1,39 H_{\text{Новое}} + 1,08 H_{\text{Тотьма}} + 0,273 H_{\text{К. Городок}}$$

3) на дату выпуска прогноза вскрылся только Юг у Кичменгского Городка

$$H_{\text{макс}} = 174 - 1,77 t_{\text{л, макс}} + 1,20 H_{\text{лдст}} + 0,554 H_{\text{Новое}} - 0,101 H_{\text{Тотьма}} + 0,589 H_{\text{К. Городок}}$$

где $t_{\text{л, макс}}$ – максимальная толщина ледяного покрова Сухоны у Великого Устюга (см); $H_{\text{лдст}}$ – максимальный при ледоставе уровень воды Сухоны у Великого Устюга (см); $H_{\text{Новое}}$, $H_{\text{Тотьма}}$ и $H_{\text{К. Городок}}$ – уровни воды рек Ёма (правый приток Сухоны) у д. Новое, Сухоны у г. Тотьма и Юга у с. Кичменгский Городок на дату выпуска прогноза (см).

Дата выпуска прогноза приурочена к дате осуществления двух событий: из трех: превышения уровня Нлдст у Великого Устюга, вскрытия Сухоны у Тотьмы или Юга у Кичменгского Городка. Заблаговременностью прогноза составляет от 1 до 7 суток и зависит от водности реки при вскрытии. При небольшой водности это 6-8 суток, при большой - 1-3 суток.

Приемлемые прогностические зависимости установлены по данным наблюдений за 1950-2008 гг. также для трех заторных участков (Сухона -д. Каликино, Юг – д. Гаврино, Сев. Двина – д. Медведки), где значителен вклад в формирование заторных максимумов расходов воды.

Разработанные локальные методики прогнозов максимальных заторных уровней воды следует отнести к категории удовлетворительных

Разработанные прогнозные зависимости внедрены в практику Вологодского филиала Северного УГМС, успешно применяются и имеют хорошую оправдываемость.

Как показывает опыт применения прогнозных методик, все они нуждаются в уточнениях по мере накопления материалов наблюдений и особенно после прохождения выдающихся наводнений.

По наблюдениям специалистов Вологодского ЦГМС гидрологическая ситуация, складывавшаяся осенью 2015 года, предвещала возникновение к началу весеннего половодья очень высокого заторного наводнения. Поэтому было решено, что специалисты ГГИ и Вологодского ЦГМС проведут совместные экспедиционные обследования образовавшегося в районе г. Великий Устюг мощного затора льда.

В рамках данной работы, взяв за основу прогнозные зависимости, разработанные в ГГИ, будут использованы методы прогнозирования, связанные с использованием нейронных сетей. Нейронные сети являются мощнейшим и гибким инструментом прогнозирования. Особенность нейронных сетей заключается в прогнозировании сложных процессов с нелинейными связями или связями не до конца понятными и изученными.

Прогнозирование с использованием нейронных сетей не является сложным, программные пакеты являются доступными, а их интерфейс интуитивно понятным. Нейронные сети уже сегодня сделали качественный рывок в совершенно различных областях, начиная с области распознаваний простых образов и заканчивая сложными творческими задачами, в том числе прогнозирования. В этом плане заторы льда с их сложным генезисом и непредсказуемостью являются идеальной областью применения для нейронных сетей. В своей работе я не ставлю целью разработки методики для краткосрочных прогнозов высокой точности, по той причине, что в этой области сделано уже достаточно много, а главное надежность уравнений, разработанных под руководством Бузина В.А., является несомненным, так

например, оправдываемость прогноза, данного на 2016 год, составила 100%. Таким образом, в данной работе поставлена цель применения нейронных сетей в области гидрологии и разработки прогностических моделей, основанных на искусственном интеллекте.

Для построения и тренировки нейронных сетей был использован пакет Statistica. STATISTICA – богатая, современная, мощная и чрезвычайно быстрая среда анализа нейросетевых моделей. STATISTICA AutomatedNeuralNetworks (SANN) является одним из самых передовых и самых эффективных нейросетевых продуктов на рынке. Он предлагает множество уникальных преимуществ и богатых возможностей. Например, уникальные возможности инструмента автоматического нейросетевого поиска. Автоматизированная нейронная сеть (АНС), позволяют использовать систему не только экспертам по нейронным сетям, но и новичкам в области нейросетевых вычислений.

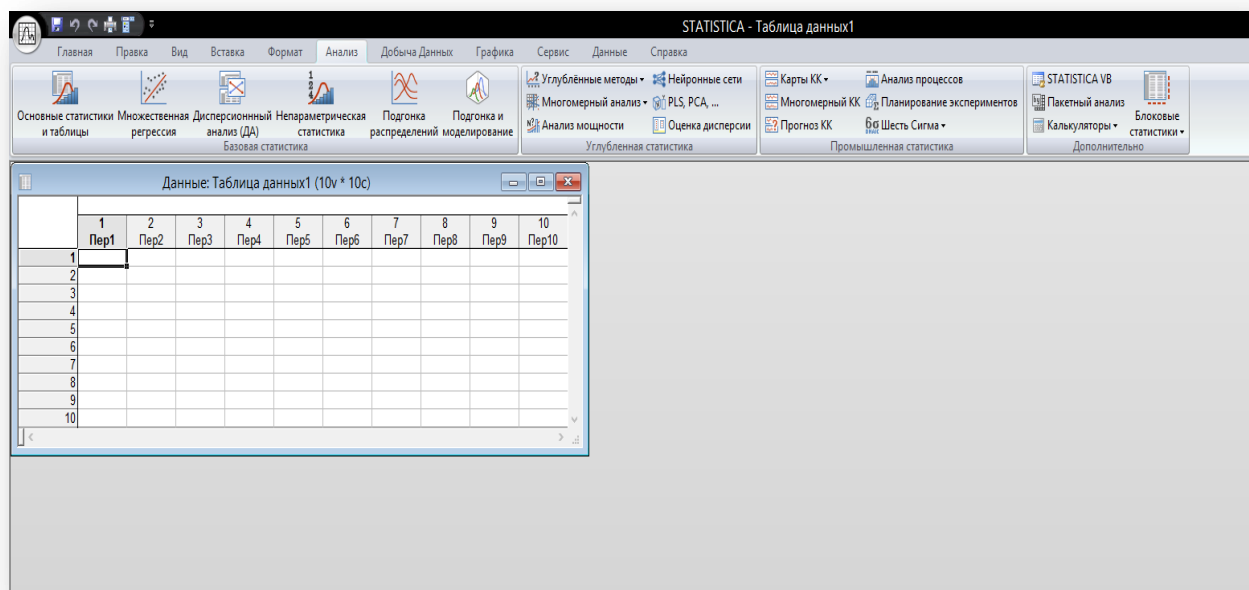


Рисунок 4.2.1 - Интерфейс программы STATISTICA

Для прогноза максимального уровня ледохода были отобраны наиболее информативные предикторы: максимальный уровень в начале ледостава, средняя температура за зимний период, сумма осадков и толщина льда на участке водопоста и ниже по течению. Первый водопост для которого был составлен прогноз был пост Абрамково, расположенный на Северной Двине. Так как на возможность образования затора льда огромное влияние оказывает не просто толщина льда, а невозможность ледохода взломать более крепкий лед, низовьев, было принято решение использовать помимо толщины льда в пункте Абрамково еще и толщину льда в Нижней Тойме и разницу между ними.

Сформированную таблицу исходных данных следует экспортировать в программу statistica и на вкладке "анализа" запустить нейро-анализ, выбрав регрессионный анализ и перейдя к следующему окну, следует выбрать пункт автоматизированные нейросети. Запуститься процесс обучения сетей.

Обучив сети, программа представит результаты обучения, которые представлены в таблице 4.2.1.

Таблица 4.2.1 - Таблица результатов обучения нейронных сетей

Архитектура	Произв. обуч.	Контр. произв.	Тест. произв.
MLP 6-9-1	-0,10	0,44	0,53
MLP 6-10-1	0,68	0,32	0,58
MLP 6-10-1	0,22	0,54	0,55
MLP 6-8-1	-0,07	0,49	0,55
MLP 6-7-1	0,14	0,46	0,56

В данной таблице представлены результаты обучения нейронных сетей. Главными параметрами являются контрольная и тестовая производительность. Контрольная производительность это эффективность нейронной сети при выходе из обучения. Тестовая производительность это эффективность нейронной сети на тестовой выборке, которая не участвовала в обучении, т.е. на независимом материале. Независимый материал выбирается перед началом обучения из всех частей ряда, т.е. тестовая выборка является выборкой за весь период наблюдения.

Данные результаты весьма примечательны: несмотря на достаточно хорошую производительность нейронных сетей, для практического использования пригодно только вторая нейронная сеть, так как лишь она одна рефлегирует на входные значения, все же остальные выдают среднее значение, считая это наиболее бесприигрышным вариантом. В следующей таблице приведены значения, полученные разными нейронными сетями для тестовой выборки.

Таблица 4.2.2 - Предсказанные значения для тестовой выборки

№	Целевая переменная	MLP 6-9-1	MLP 6-10-1	MLP 6-10-1	MLP 6-8-1	MLP 6-7-1
20	493	572	482	571	572	571
26	484	572	373	570	572	567
27	379	572	466	571	572	570
39	443	572	460	571	572	570
56	308	572	428	570	572	569
58	596	572	660	572	572	574
60	659	572	513	572	572	571

Как видно из данной таблицы все нейронные сети, кроме второй, стремятся выдать значения, близкие к среднему (среднее значение по ряду 578 см). Вторая же нейронная сеть дает, в целом, приемлемые результаты.

Данные результаты можно признать удовлетворительными для долгосрочно прогнозирования. Ниже приведен график предсказанных и наблюдаемых значений.

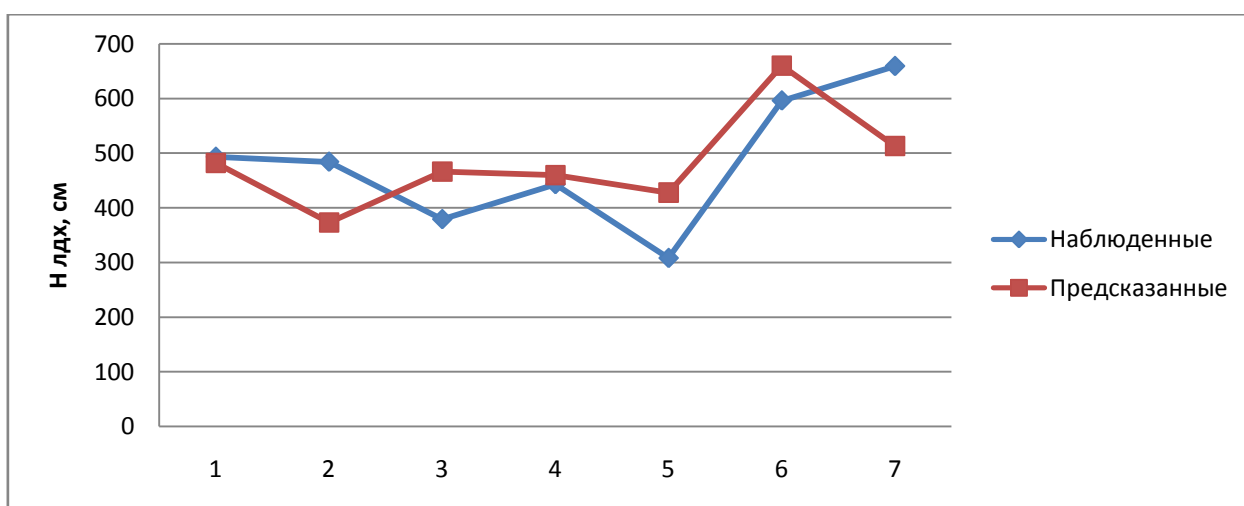


Рисунок 4.2.2 График предсказанных и наблюдаемых значений нейронной сети MLP 6-10-1 для тестовой выборки

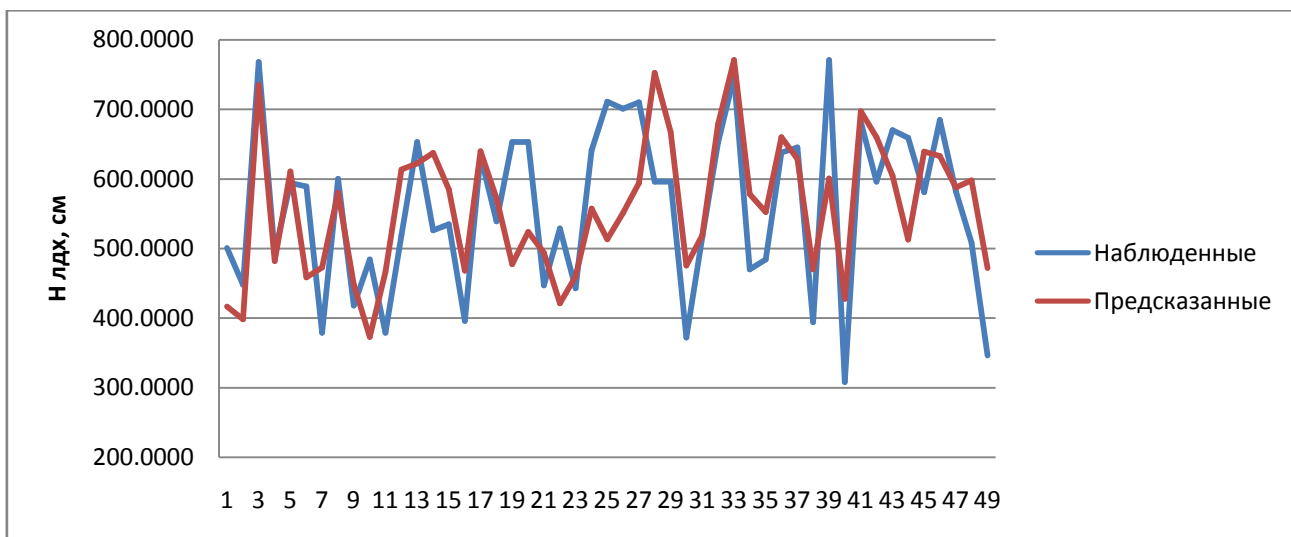


Рисунок 4.2.3 - График предсказанных и наблюдаемых значений для нейронной сети MLP 6-10-1 для обучающей, контрольной и тестовой выборки

Анализируя данные графики можно заметить, что нейросеть хорошо аппроксимирует наблюдаемые значения, хорошо реагирует на выбросы. Так же можно заметить, что нейросеть одинаково хорошо проявляет себя как на максимальных, так и на минимальных значениях. Присутствующие ошибки в первую очередь связаны со спецификой долгосрочного прогнозирования, дело в том, что огромный вклад в формирование высшего уровня ледохода вносит именно характер снеготаяния и половодья, что в первую очередь отражается на так называемых выбросах. Используя данный прогноз в качестве фоновый и оценочный, его можно рекомендовать для долгосрочного планирования предупредительных мероприятий. Так же учитывая, большую заблаговременность данного прогноза – больше 2 месяцев, его можно корректировать по ходу развития событий.

Таблица 4.2.3 Анализ чувствительности для предикторов

Архитектура сети	Дельта Н льда	Н льда,Абрамков о.	Нср.зим н. осадки	Нльда,Н. Т	Тср.зи м.	Нлдс т
2.MLP 6-10-1	1,5	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1

Приведенная таблица подтверждает значимость предложенного в данной работе дополнительного предиктора и даже ставит его на первое место. В целом все предикторы имеют примерно одинаковую значимость, что свидетельствует о правильности их отбора. По оценке ГМЦ прогнозы, данные с использованием MLP 6-10-1 относятся к категории удовлетворительных. Однако коэффициент Нэша-Сатклиффа данных прогнозов равен 0,30, а у лучших регрессионных зависимостей 0,25 это делает данную нейронную сеть лучшей в своем роде.

Для максимально упрощенного прогноза с наибольшей заблаговременностью можно отбросить все дополнительные параметры и использовать лишь максимальный уровень при ледоставе, таким образом, заблаговременность данного прогноза составит более полугода. Для решения данной задачи так же был построен ансамбль нейронных сетей. Хотя, в данном случае, вполне возможно использовать и уравнение регрессии.

Для построения данной зависимости были использованы сети другого типа - архитектуры РБФ (Радиально базисной функции). Радиальные базисные функции. РБФ сеть - это вид нейронной сети, имеющий промежуточный слой из радиальных элементов и выходной слой из линейных элементов. Сети этого типа довольно компактны и быстро обучаются. Предложены в работах Broomhead and Lowe (1988) и Moody and Darkin (1989), описаны в большинстве учебников по нейронным

сетям (например, Bishop, 1995; Haykin, 1994). Данные сети в сравнении с МЛП сетями дали лучшие результаты.

Таблица 4.2.4 - Таблица результатов обучения нейронных сетей

Данная таблица демонстрирует результаты обучения и тестирования

Архитектура	Производительность обуч.	Контр.производительность.	Тест.производительность.
RBF 1-14-1	0,15	0,33	0,51

для лучшей сети. Тестовая производительность является достаточно высокой, для долгосрочного прогнозирования. Ниже представлены графики для тестовой выборки.

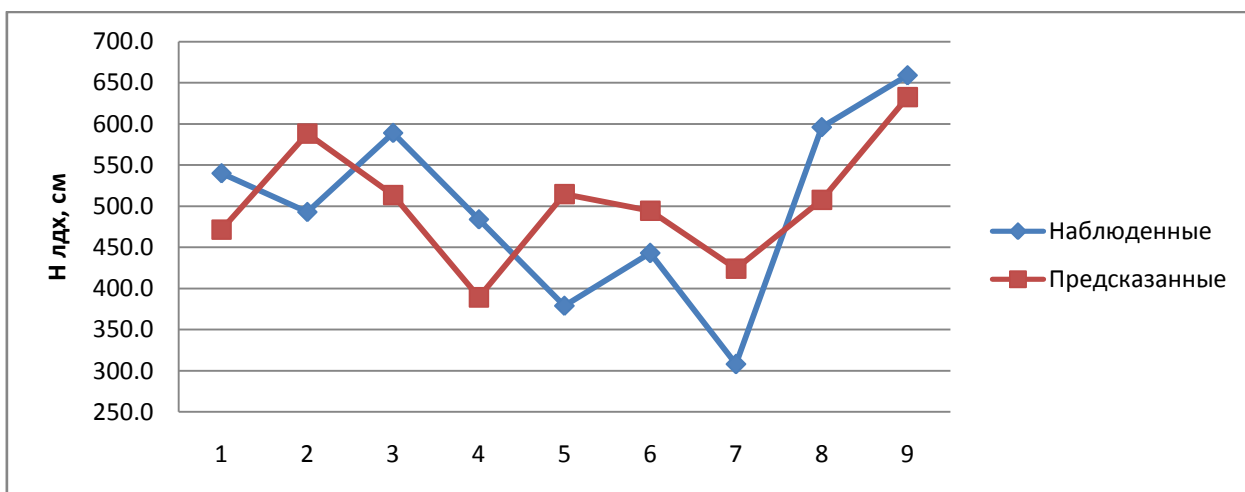


Рисунок 4.2.4 График предсказанных и наблюдаемых значений нейронной сети RBF 1-14-1 для тестовой выборки

Данный график свидетельствует о неплохих результатах, полученных с помощью данной сети.

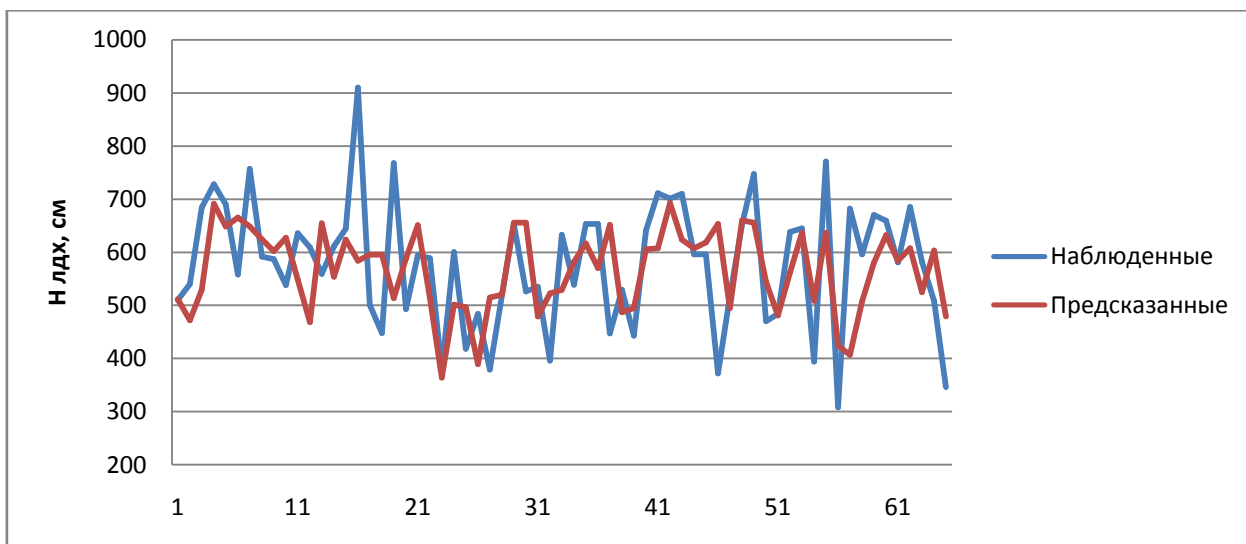


Рисунок 4.2.5 График предсказанных и наблюдаемых значений для нейронной сети MLP 6-10-1 для обучающей, контрольной и тестовой выборки

Данный график демонстрирует поведение нейронной сети. Можно отметить что нейронная сеть установила хорошую связь между величинами и прекрасно описывает ход графика. Однако наблюдается очень большая ошибка около 300 см для уровня при заторе льда, наблюдаемого 27.04.1966 и составивший 910 см. Это самый высокий уровень за весь период наблюдений, находящийся для данной модели в обучающей подвыборке.

Как говорилось ранее, развитие заторов льда во много зависит от хода весны и не поддается прогнозированию с большой заблаговременностью. В целом же данная модель дает удовлетворительные результаты при заблаговременности более 4-5 месяцев.

Для того, чтобы доказать большую эффективность нейросетей, было построено простейшее уравнение регрессии между максимальным ледоставным и ледоходным уровнем, данное уравнение представлено на рисунке 4.2.5.

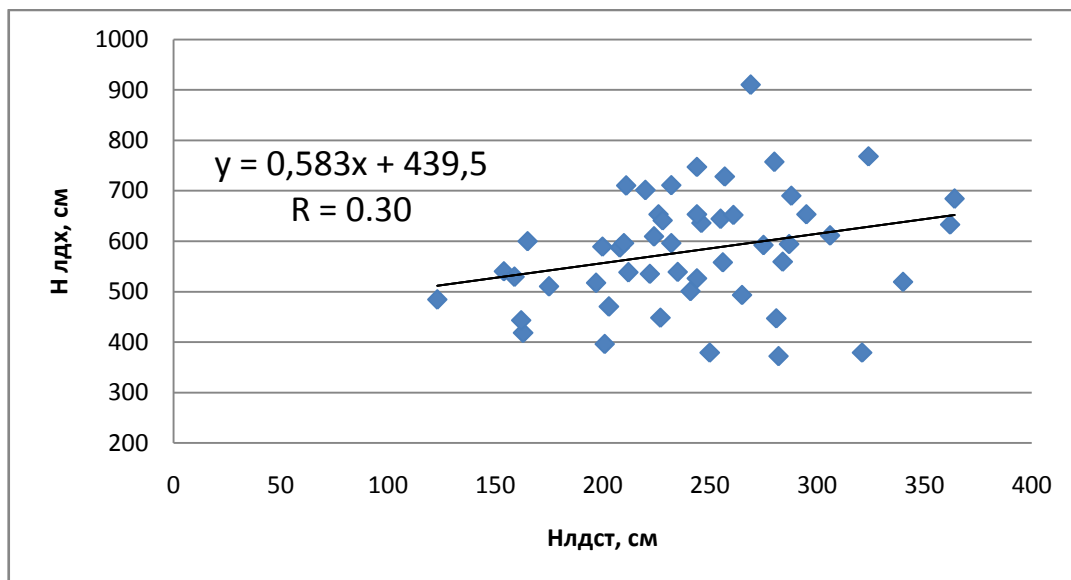


Рисунок 4.2.6 Уравнение связи между, максимальным ледоставным и ледоходным уровнем

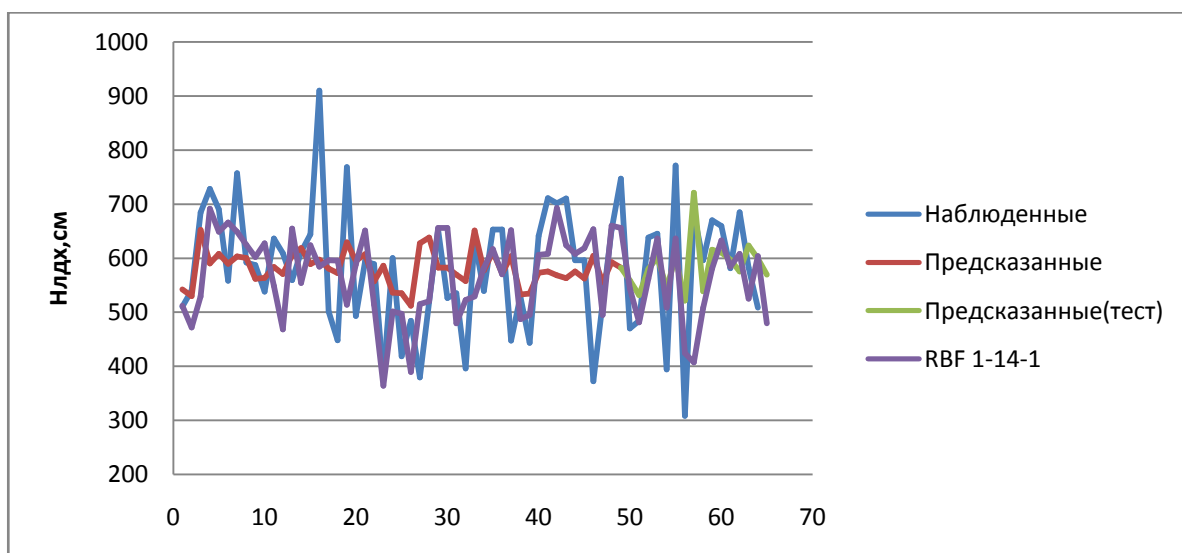


Рисунок 4.2.7 График прогноза максимальных ледоходных уровней с помощью уравнения регрессии

Анализируя совместный график, можно отметить схожесть результатов между двумя сетями, хотя нейронная сеть и лучше отрабатывает минимумы и максимумы абсолютная ошибка нейронной сети примерно на 10-15% меньше ошибки регрессионного уравнения. Стоит так же отметить, что обе модели не смогли правильно предсказать уровень 1966 года.

Взяв за основу все выше сказанное, был обучен ансамбль нейронных сетей для затороопасного участка в створе Великий Устюг.

Используя все те же предикторы, что использовались при расчете максимального ледоходного уровня в створе Абрамково, были построены сети и выбрано две лучшие. Данные сети являются одинаковыми по архитектуре, однако несколько по-разному работают. Первая сеть, хоть и имеет большую производительность, несколько хуже описывает мощные заторные наводнения, как и сети использованные ранее. Вторая же сеть, обладая схожей, хоть и чуть меньшей производительностью, очень точно описывает именно максимумы, что свидетельствует о возможности использование этих сетей в ансамбле. Ниже представлена таблица производительности данных сетей.

Таблица 4.2.5 Таблица результатов обучения нейронных сетей

Архитектура	Произв.обуч.	Контр. произв.	Тест. произв.
MLP 6-3-1	0,62	0,52	0,90
MLP 6-4-1	0,69	0,35	0,88

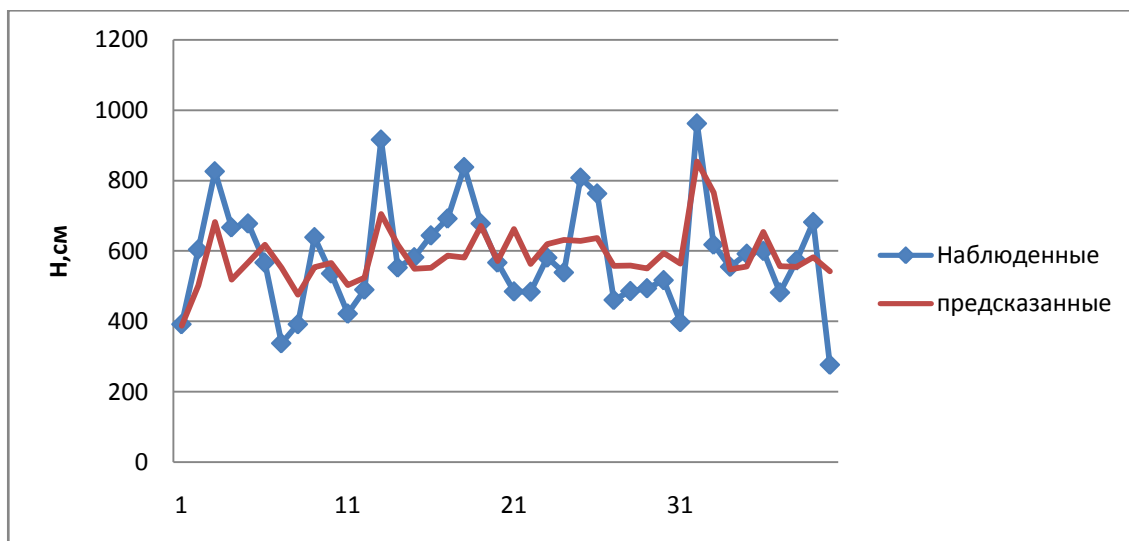


Рисунок 4.2.8 - График предсказанных и наблюдаемых значений для ансамбля нейронных сетей для обучающей, контрольной и тестовой выборки

Так же, в силу того, что наблюдения за осадками начались с 1966 года, имеется большое окно незадействованных данных, которые так же было решено использовать в качестве тестовых. Для данного прогноза количество осадков, выпавших за зимний период, было принято равным их среднему значению за весь период наблюдений, а именно 180 мм.

Несмотря на такое допущение, нейросеть MLP 6-4-1 отработала хорошо, нейросеть MLP 6-3-1 потеряла устойчивость. Поэтому результаты, полученные по ней, были забракованы. Результаты же, полученные посредством MLP 6-4-1, приведены на графике.

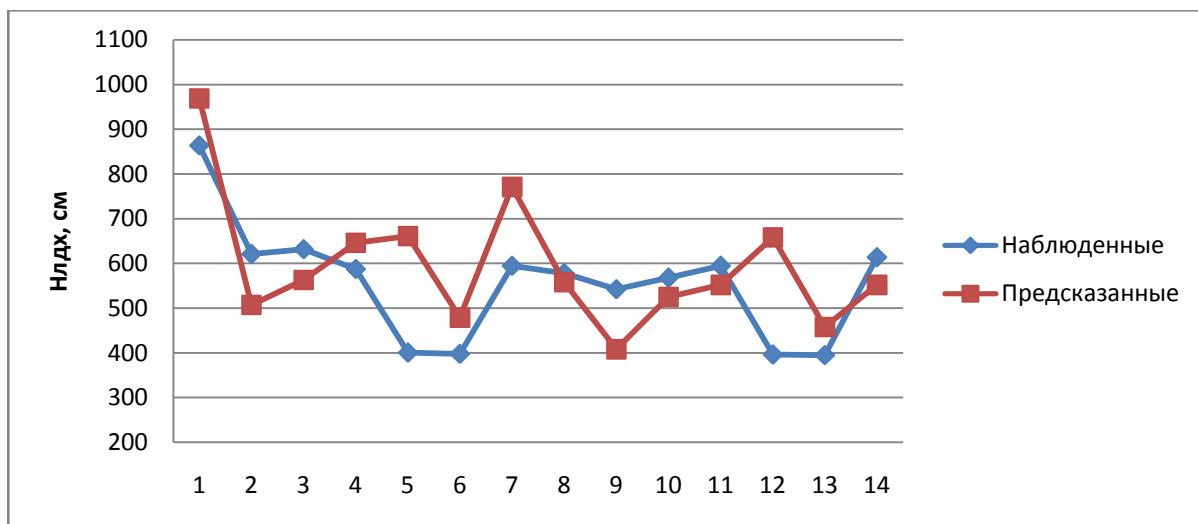


Рисунок 4.2.9 - График предсказанных и наблюдаемых значений нейронной сети MLP 6-4-1 для тестовой выборки

Данная сеть, хорошо описывает уровни, именно заторного генезиса, что делает данную сеть более остальных пригодной для прогнозирования максимальных уровней весеннего ледохода с большой заблаговременностью.

Сравнивая данные результаты с результатами, полученными при помощи уравнения множественной регрессии. В данном случае следует прийти к выводу, что регрессионные зависимости являются более надежными. Так множественный коэффициент корреляции подобной зависимости равен 0,55. Ниже представлен совместный график прогнозируемых величин.

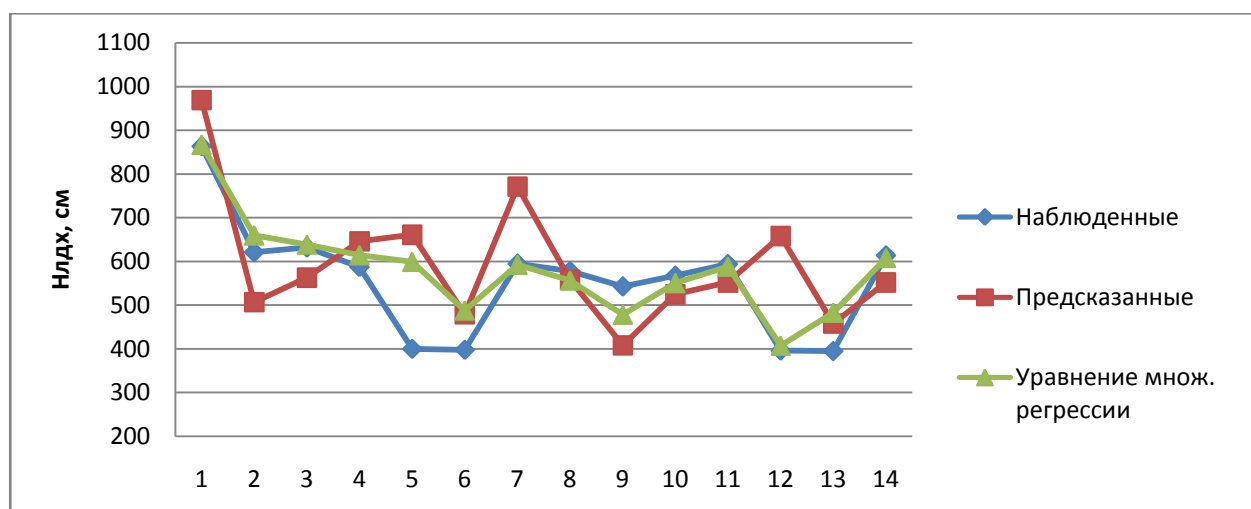


Рисунок 4.2.10 - График предсказанных и наблюдаемых значений для нейронной сети MLP 6-4-1 и уравнения множественной регрессии для тестовой выборки

Таблица 4.2.6 - Параметры уравнения множественной регрессии

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t- статистика	P- Значение
Y-пересечение	187,97	292	0,64	0,52
Толщина льда	1,97	2,74	0,72	0,48
Тср.зимн.	4,76	13,6	0,35	0,73
Нльдамедв	0,00	0,00	65535	
Дельта льда	4,54	2,71	1,68	0,10
Осадки(за зимн пер)	0,61	0,79	0,77	0,45
Н макс лдст	1,20	0,39	3,08	0,00

4.3 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Прогнозированию временных рядов уделено большое внимание в различных работах отечественных и зарубежных источниках. На сегодняшний день существует достаточное количество прогностических методик. Одна из них, ставшая основной на сегодняшний день это методика АРПСС (авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего), описанная в работах Бокса и Дженкинса. Модель авторегрессии и скользящего среднего - общая модель, предложенная Боксом и Дженкинсом (1976) включает как параметры авторегрессии, так и параметры скользящего среднего. Именно, имеется три типа параметров модели: параметры авторегрессии (p), порядок разности (d), параметры скользящего среднего (q). В обозначениях Бокса и Дженкинса модель записывается как АРПСС (p, d, q). Например, модель $(0, 1, 2)$ содержит 0 (нуль) параметров авторегрессии (p) и 2 параметра скользящего среднего (q), которые вычисляются для ряда после взятия разности с лагом 1.

Процесс авторегрессии.

Большинство временных рядов содержат элементы, которые последовательно зависят друг от друга. Такую зависимость можно выразить следующим уравнением:

$$x_t = \xi + \phi_1 * x_{(t-1)} + \phi_2 * x_{(t-2)} + \phi_3 * x_{(t-3)} + \dots + \varepsilon$$

Здесь: ξ - константа (свободный член);

ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 - параметры авторегрессии.

Каждое наблюдение есть сумма случайной компоненты (случайное воздействие, ε) и линейной комбинации предыдущих наблюдений.

Требование стационарности.

Заметим, что процесс авторегрессии будет стационарным только, если его параметры лежат в определенном диапазоне. Например, если имеется только один параметр, то он должен находиться в интервале $-1 < \phi < +1$. В противном случае, предыдущие значения будут накапливаться и значения

последующих x_t могут быть неограниченными, следовательно, ряд не будет стационарным. Если имеется несколько параметров авторегрессии, то можно определить аналогичные условия, обеспечивающие стационарность (см. например, Бокс и Дженкинс, 1976; Montgomery, 1990).

Процесс скользящего среднего.

В отличие от процесса авторегрессии, в процессе скользящего среднего каждый элемент ряда подвержен суммарному воздействию предыдущих ошибок. В общем виде это можно записать следующим образом:

$$x_t = \mu + \varepsilon_t - \theta_1 * \varepsilon_{(t-1)} - \theta_2 * \varepsilon_{(t-2)} - \theta_3 * \varepsilon_{(t-3)} - \dots$$

Здесь:

μ - константа,

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ - параметры скользящего среднего.

В нашей стране модель АРПСС впервые применялась для прогнозирования уровней озер, в частности, Ладожского озера. Позднее данная методика была использована для прогнозирования расходов и уровней рек.

В рамках диссертационной работы при помощи модели АРПСС были спрогнозированы среднегодовые и среднемесячные расходы воды реки Северная Двина в пунктах Абрамково стока Северной Двины. Результаты, полученные при помощи моделей АРПСС, были сопоставлены с результатами, полученными при использовании нейронных сетей.

Параметры модели АРПСС подбираются опытным путем из соображений минимализирования ошибок. Ниже представлена гистограмма распределения ошибок для модели АРПСС(1,0,1).

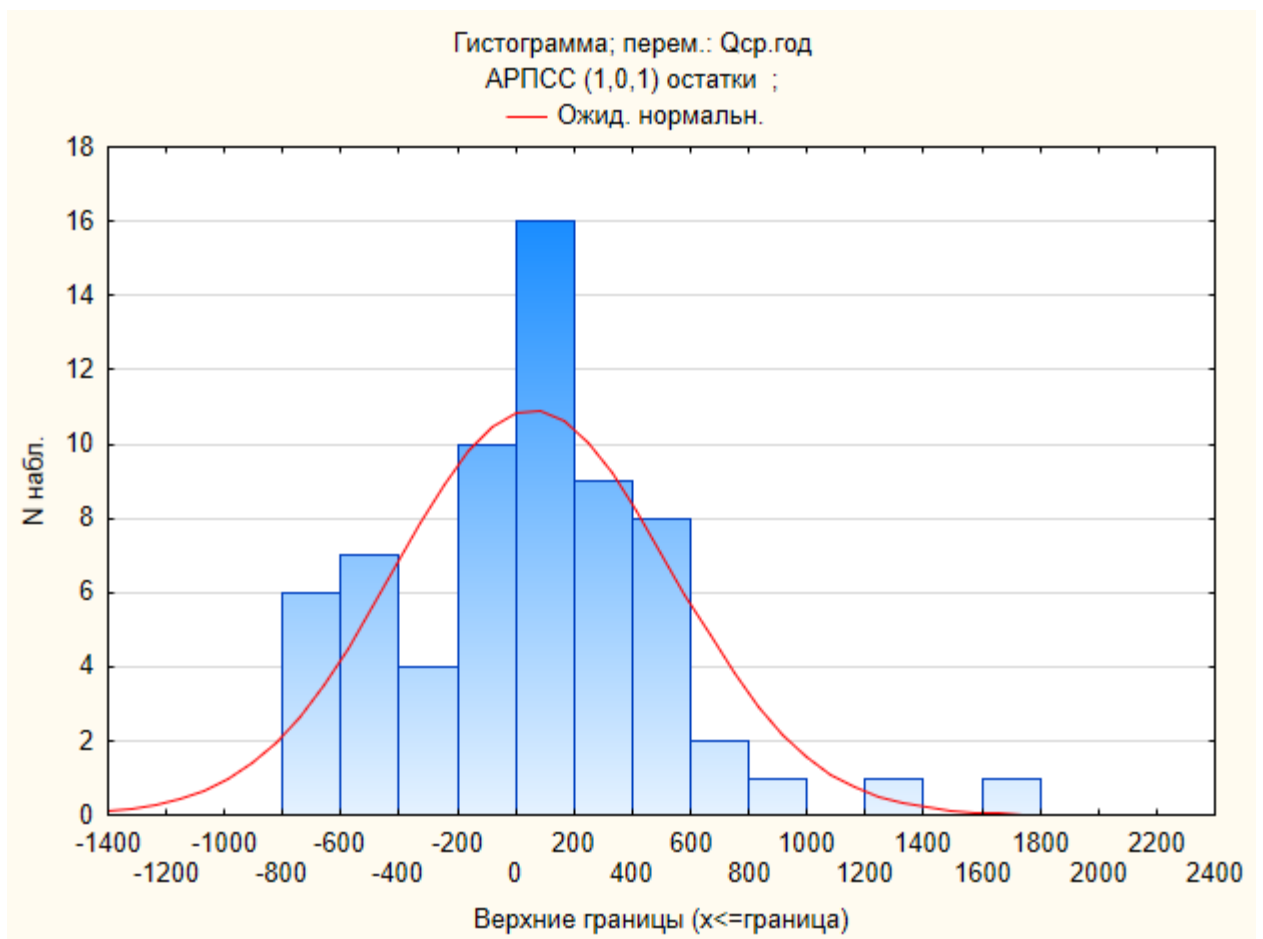


Рисунок 4.3.1 - Гистограмма распределения ошибок модели АРПСС(1,0,1)

Данная модель обладает значимыми параметрами АР и СС и удовлетворительной величиной ошибок. Следовательно, данная модель может использоваться при прогнозировании среднегодового расхода воды.

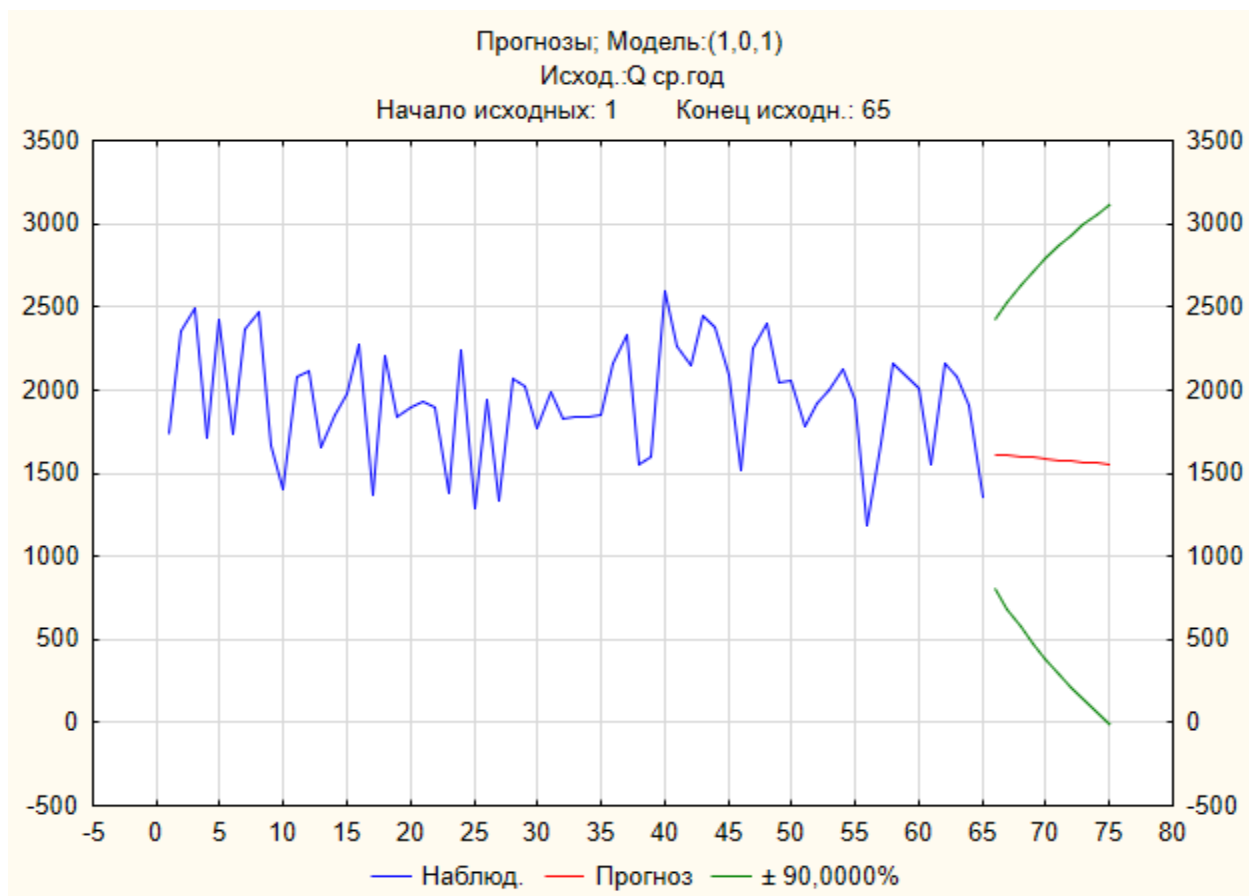


Рисунок 4.3.2 - график прогноза с использованием модели АРПСС на 10 лет

Из анализа данного графика следует, что среднегодовое значение расхода воды в течение ближайших десяти лет будет снижаться.

Стоит отметить, что, несмотря на хвалебные отзывы о данной модели, использование ее весьма ограничено и специфично. Так, на данном графике нанесен доверительный интервал, делающий данный прогноз, по сути, бессмысленным, прогноз же данный с использованием данной модели мало чем отличается от прогноза, полученного экстраполяцией линейного тренда (рис 4.3.3).

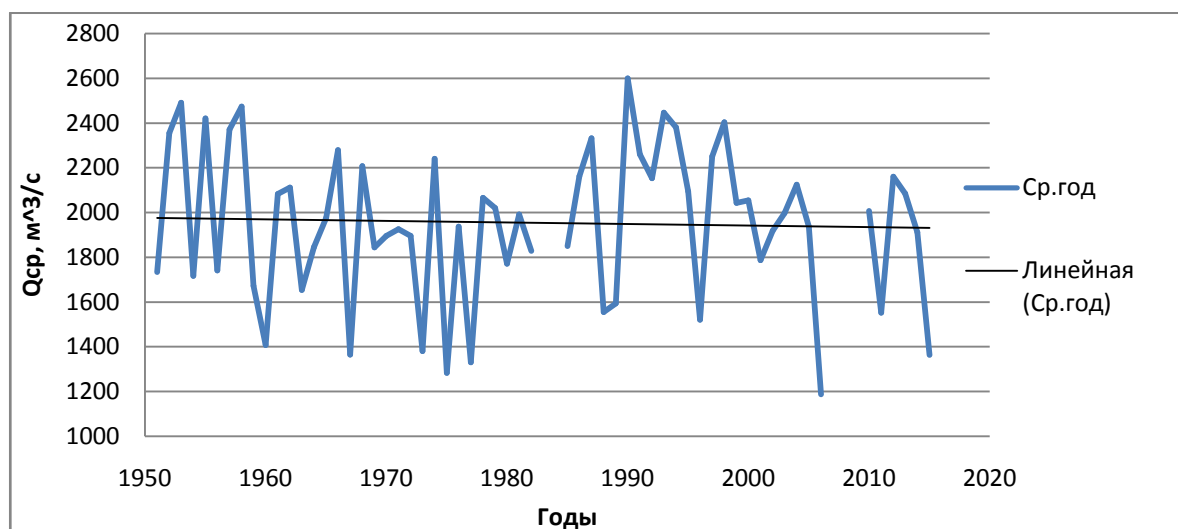


Рисунок 4.3.3 - Значения среднегодового расхода воды р. Северной Двины в д.Абрамково

Анализируя линейный тренд данного графика можно придти к выводу об идентичности прогноз данных разными методами.

Гораздо лучшие результаты дают модели АРПСС при прогнозировании среднемесячных величин. Ниже представлена гистограмма распределения ошибок модели АРПСС для среднемесячных расходов воды Северной Двины в д. Абрамково.

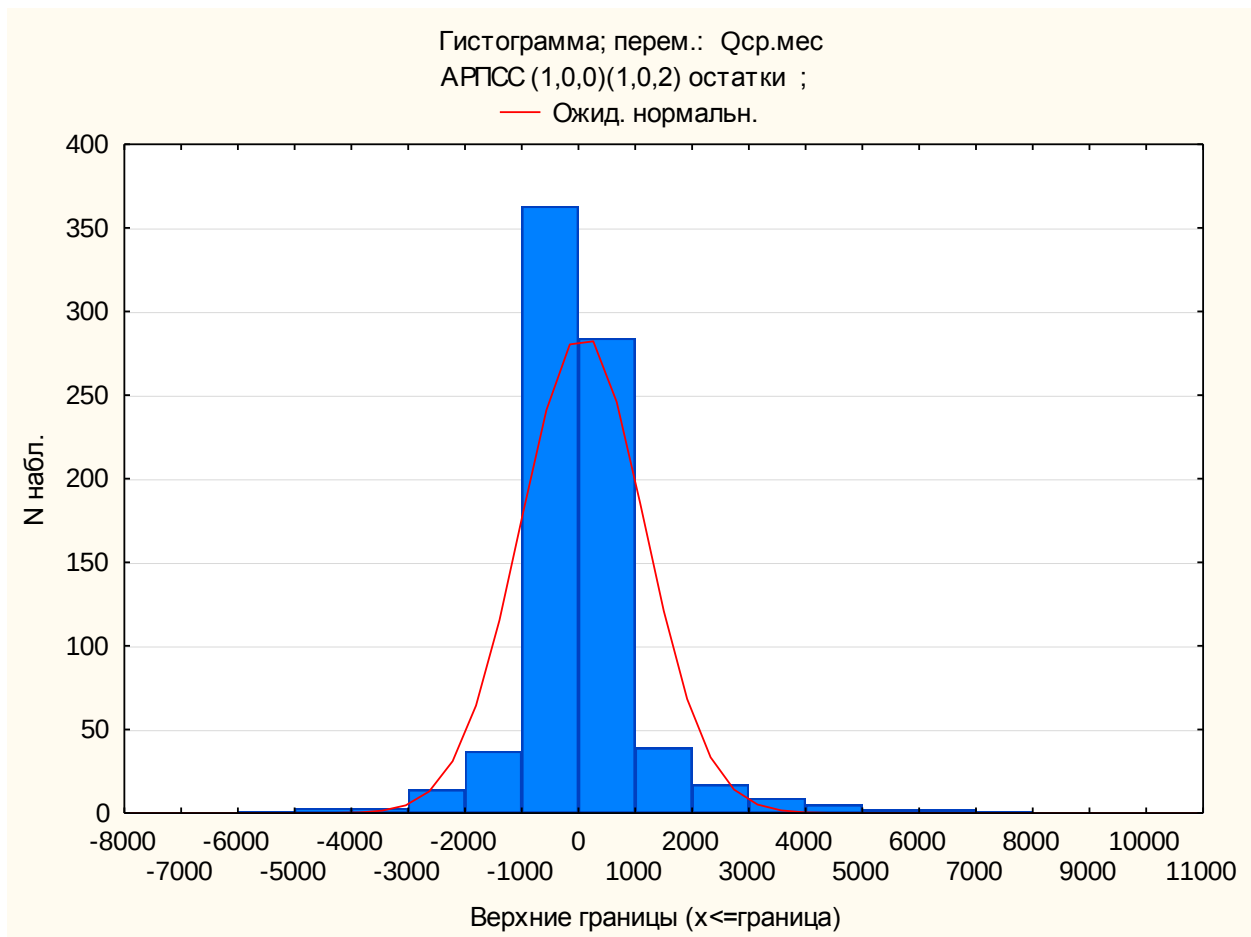


Рисунок 4.3.4 Гистограмма распределения ошибок модели
АРПСС(1,0,0)(1,0,2)

Распределение ошибок данной модели близко к нормальному, а их величина равнозначна ошибкам аналогичных моделей.

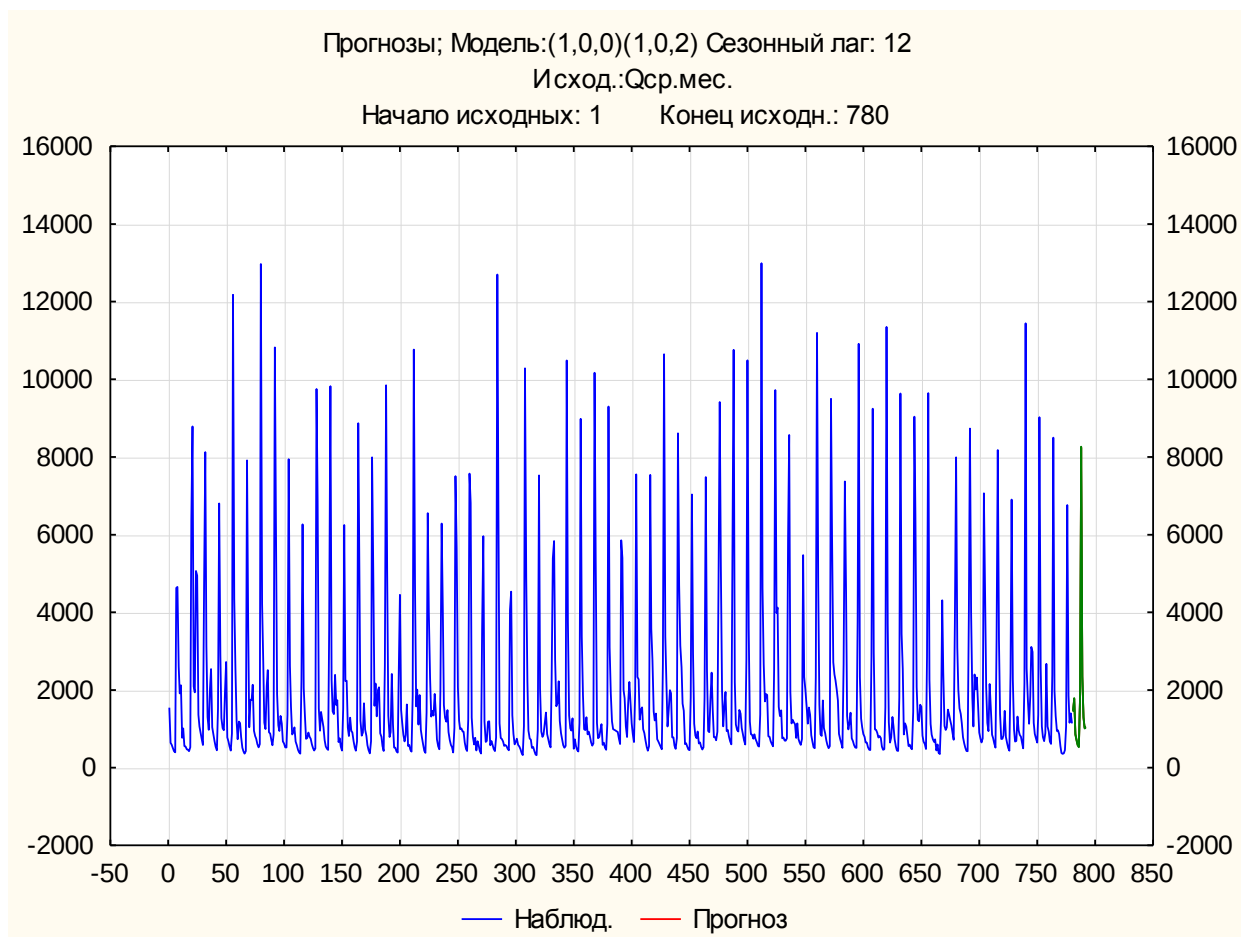


Рисунок 4.3.5- График прогноза на 12 месяцев с использованием модели АРПСС (1,0,0)(1,0,2)

Аналогичные результаты получаются и при использовании нейронных сетей. Для обучения нейронных сетей были использованы среднемесячные расходы воды Северной Двины в д. Абрамково. Для прогнозирования временных рядов в программе Statistica можно использовать сети RBF и MLP. Сети RBF можно использовать для любых рядов, которые не имеют статистически значимых трендов. MLP сети более гибкие, однако, зачастую дают худшие результаты, в сравнении с сетями RBF. Всего было обучено более 2000 сетей различных типов и конфигураций. В итоге была выбрана лучшая сеть: RBF 12-30-1. Из названия следует, что данная сеть обладает 12 входами (12 месяцев предыдущего года), 30 скрытыми нейронами и 1 выходом.

Таблица 4.3.1 - производительность нейронной сети

Архитектура	Производительность		
	Обучения	Контрольная	Тестовая
RBF 12-30-1	0,86	0,88	0,92

Данная сеть обладает значимыми, а главное равными коэффициентами корреляции на всех подвыборках, что свидетельствует о стабильно хорошей работе на всем протяжении исходного ряда. Ниже представлена гистограмма остатков для данной модели.

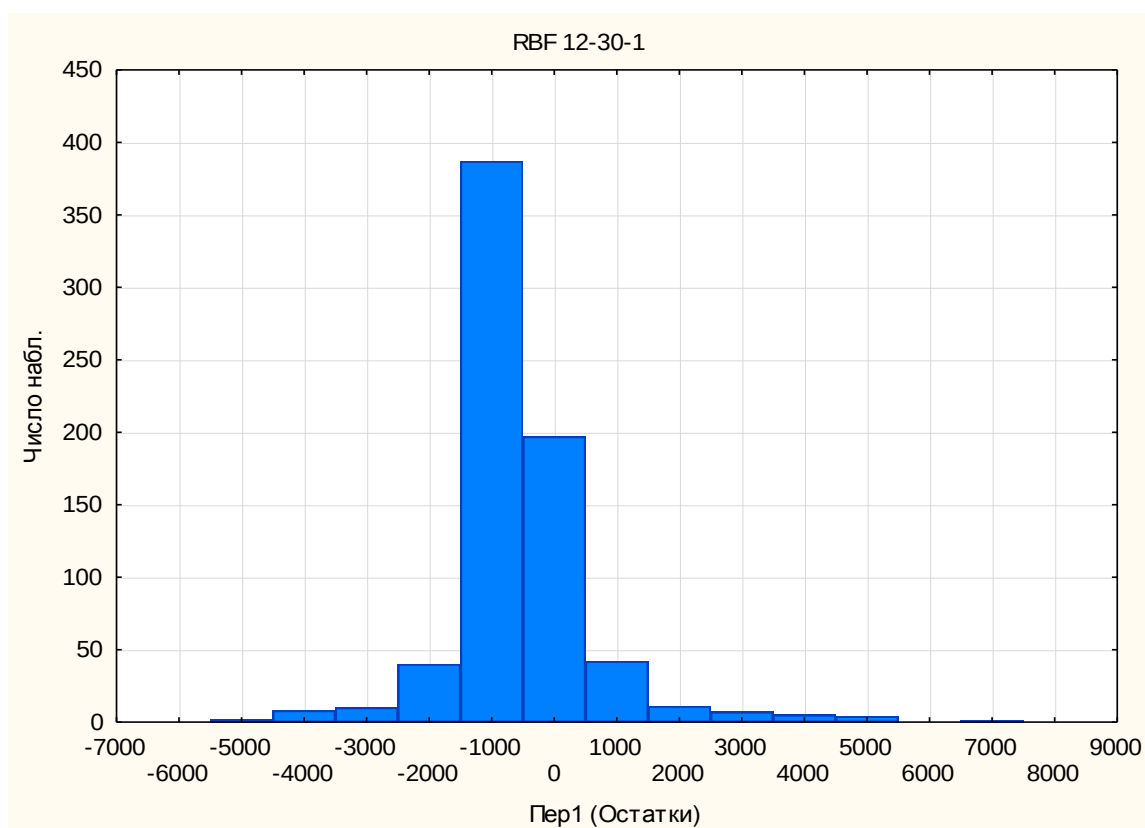


Рисунок 4.3.6 Гистограмма распределения ошибок модели

RBF 12-30-1

Распределение ошибок, в целом, подчиняется нормальному закону распределения. Несколько большие значения объясняются большой дисперсией максимальных расходов воды.



Рисунок 4.3.7 Прогноз на год вперед с использованием нейронной сети
RBF 12-30-1

При оценке прогнозов данной модели были использованы метод ГМЦ и Нэша-Сатклиффа.

Для оценки прогнозов, данных RBF 12-30-1, была использована тестовая выборка длиной 105 наблюдений, которые располагаются равномерно по всему ряду (рис 4.3.8).

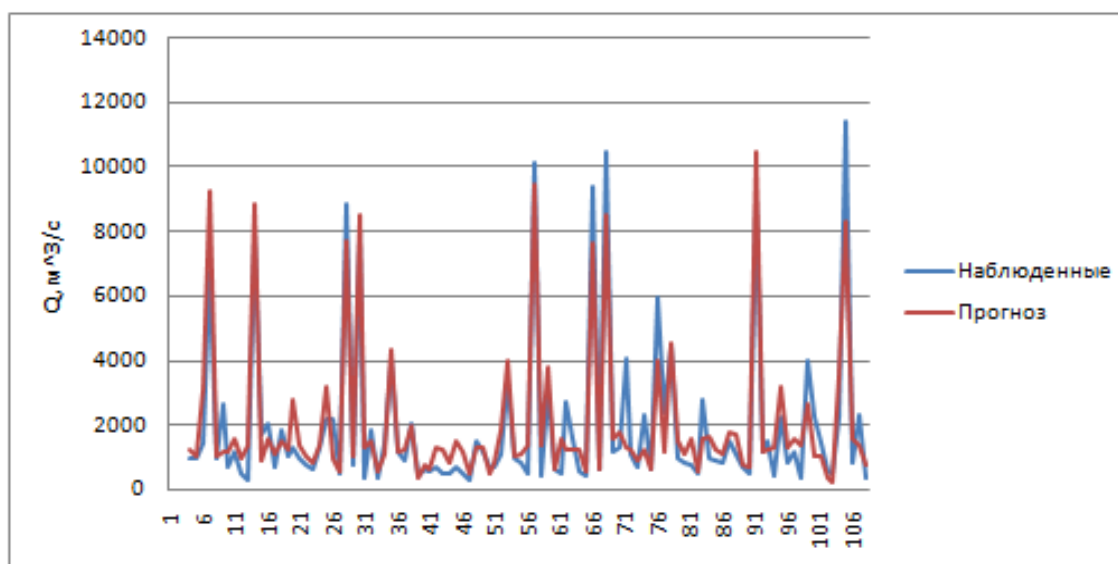


Рисунок 4.3.8 график проверки прогнозов на независимом материале

Для данной выборки был рассчитан коэффициент Нэша-Сатклиффа, он составил 0,81. По оценке ГМЦ прогнозы, данные с использование модели RBF 12-30-1, относятся к категории отличных $\delta=0.28\delta_{\text{доп}}$.

Согласно прогнозам и натурным наблюдением в ближайшее время ожидается снижение водности Северной Двины. В целом, этому есть физическое обоснование и доказательства. В последние годы наблюдений тренд максимальных запасов воды в снеге изменил свой знак на отрицательный. Что привело к некоторому, пока статистически незначимому, снижению объемов весеннего половодья. В свою очередь наблюдается сильное статистически значимое падение летней межени, объясняемое повышением температуры и смещение сроков половодья на более ранние, что в свою очередь увеличивает продолжительность летне-осенней межени. Учитывая факт увеличения значимости антропогенного фактора и того, что положительный тренд температуры воздуха может продлиться еще какое-то время, можно сделать вывод о том, что прогнозы, полученные с использованием обеих методов, являются обоснованными и реалистичными

4.4 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО ГОДОВОГО РАСХОДА ВОДЫ

Максимальные расходы воды являются крайне важной характеристикой водного режима рек. Питание рек Северного края является снеговым, что обуславливает достаточно тесные связи между объемами половодья и запасами воды в снеге. Несомненно, значение максимального расхода воды не зависит от одного лишь запаса воды в снеге, но и обуславливается значениями коэффициента дружности весеннего половодья, его характером. Для таких крупных рек, как Северная Двина весеннее половодье может растягиваться на значительные временные промежутки, однако его пик наблюдается с апреля по май. Максимальный расход воды редко совпадает с максимальным ледоходным уровнем и наблюдается, как правило, несколько позже него, так как имеет другой генезис. Величина максимального уровня воды во многом обуславливается подпорами уровня при ледоходе. Для максимального расхода воды требуется наибольшая пропускная способность русла, следовательно, как правило, он наблюдается после окончания ледохода с разницей до одного месяца.

В виду сложного генезиса, прогнозирование максимального расхода воды с большой заблаговременностью является достаточно сложной задачей, которая требует комплексного и последовательного анализа факторов, влияющих на него.

Наиболее важным фактором, влияющим на максимальный расход воды, должен быть запас воды в снеге. Данные по маршрутным снегосьемкам не представляет труда получить из открытых источников, однако они требуют обработки и обобщения. Периодичность снегосьемок составляет 1 раз в 5 дней и начинается с момента появления устойчивого снежного покрова и кончается при его полном стаивании. Данные маршрутных снегосьемок включают основные физические характеристики

снежного покрова: степень покрытости местности снегом и ледяной коркой, их толщина, плотность снега и запас воды в снеге. Однако в качестве предикторов можно использовать лишь максимально информативные параметры. Такими параметрами являются: максимальный запасы воды в снеге на начало снеготаяния для поля и леса, дата снегосъемки, выраженная в количестве дней от начала года и определяющая заблаговременность, в качестве дополнительного параметра, не влияющего на заблаговременность, был использован максимальный уровень при ледоставе, который хорошо зарекомендовал себя в предыдущих моделях.

Заблаговременность прогноза, как сказано выше, определяется датой снегосъемки, при которой запас воды в снеге является максимальным, и составляет от 23 до 74 дней.

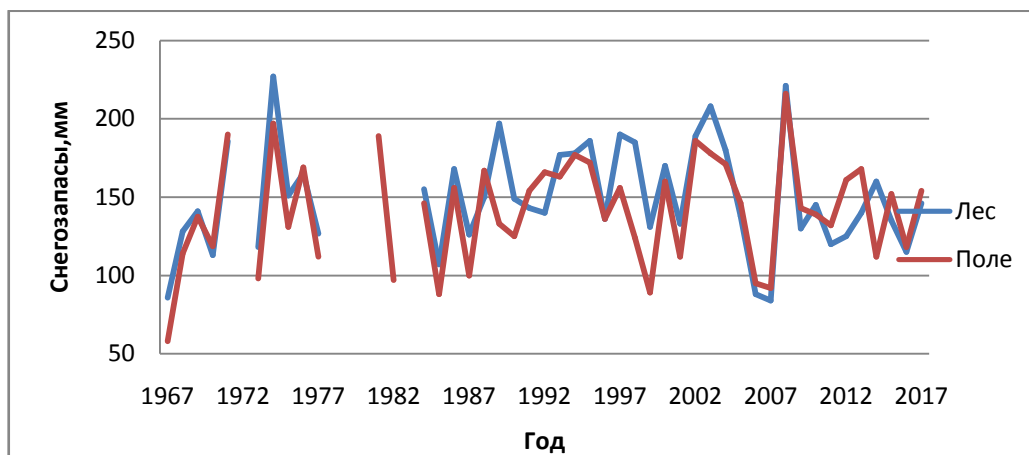


Рисунок 4.4.1 - Хронологический график запасов воды в снеге

Анализ запасов воды в снеге показывает некоторое статистически незначимое снижение данной величины в последние годы наблюдений. Измерения запасов воды в снеге не являются постоянными, что вносит некоторые ограничения на использование ряда целиком. Для построения прогностических зависимостей, использовался ряд с 1984 по 2014 год. Оставшийся период использовался для проверки моделей на независимом материале.

По аналогии с предыдущими моделями, были обучены нейронные сети, а также построено множественное уравнение регрессии. В результате обучения и перебора различных параметров и видов нейронных сетей, лучшие результаты показали сети MLP, которые не обладают большим количеством скрытых нейронов, что связано с достаточно маленьким обучающим периодом. Лучшая обученная сеть имела 6 предикторов, 5 скрытых нейронов и 1 выход (табл 4.4.1).

Таблица 4.4.1 - Таблица результатов обучения нейронных сетей

Архитектура	Произв. обуч.	Контр. произв.	Тест. Произв.	Ф-я актив. скрытых нейр.	Ф-я актив. выходных нейр.
MLP 6-5-1	0,94	0,80	0,77	Гипербол.	Гипербол.

Производительность данной сети несколько падает на независимом материале, что в целом не является большой проблемой т.к. ее уровень вполне достаточен. Ошибки данной сети не являются критическими и, как правило, связаны с плохой исходной информацией, особенно по наличию ледяной корки. Так же можно отметить, что сеть лучше прогнозирует максимальные значения расходов воды, чем средние или минимальные.

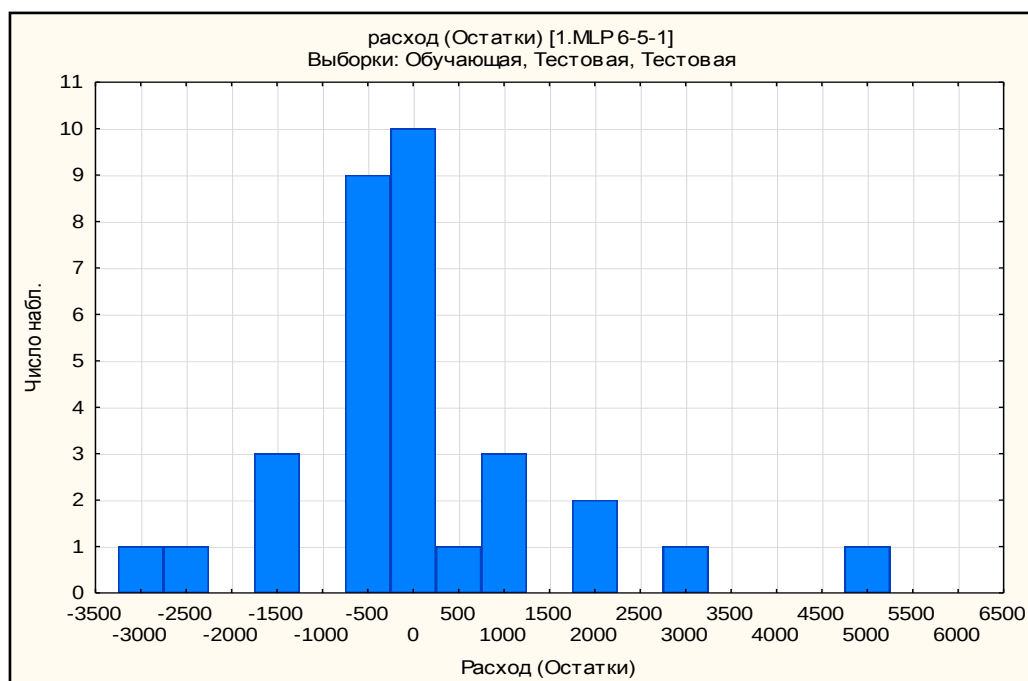


Рисунок 4.4.2 - Гистограмма остатков сети MLP 6-5-1

Максимальная плотность вероятности охватывает значения близкие к нулевым, распределение же остатков близко к нормальному, но обладает небольшой положительной асимметрией

Прогнозы, данные с использованием данной модели, обладают коэффициентом Нэша-Сатклиффа равным 0,86, а по оценке ГМЦ относятся к категории отличных.



Рисунок 4.4.3 -Наблюдаемые и предсказанные значения расходов воды с помощью MLP 6-5-1

Таблица 4.4.2 - Статистическая значимость предикторов

	Уров лдст	Дата снегосъемки	Толщина лед. корки	Лес	Поле	Ст.льда
1.MLP 6-5-1	25	12	8	7	6	2

Наибольшую значимость для модели MLP 6-5-1 имеет максимальный уровень при ледоставе. Толщина ледяной корки и ее наличие может согласно модели может оказывать различное влияние. Это можно объяснить тем, что водосбор створа имеет значительную площадь, с достаточно низким коэффициентом дружности весеннего половодья и большим временем добегания. Ледяная же корка, препятствуя на первом этапе снеготаяния проникновению воды в грунт и его насыщению, приводит к снижению максимального расхода воды, который наблюдается значительно позже начала снеготаяния. Так или иначе, лет с наличием ледяной корки чрезвычайно мало, и делать однозначные выводы нельзя. Отказ же от данного предиктора, к сожалению, не возможен в силу значительного падения производительности моделей.

Также интересно заметить, что в данной модели и во многих других значимость лесной составляющей выше, чем полевой. Это так же можно объяснить величиной водосбора и большим временем добегания. В данном случае можно выдвинуть предположение о том, что полевая составляющая более важна для весеннего ледохода, максимум же определяется запасами снега в лесу.

Помимо нейросетевых моделей были использованы и регрессионные зависимости с теми же предикторами.

Уравнение множественной регрессии имеет коэффициент корреляции 0,42, что, конечно же, не может считаться достаточным (табл.4.4.3)

Таблица 4.4.3 - Регрессионная статистика

Регрессионная статистика	Значение
Множественный R	0,42
R-квадрат	0,18
Нормированный R-квадрат	-0,02
Стандартная ошибка	3130
Наблюдения	32

Оценка значимости всего уравнения и его отдельных параметров, показала небольшую его эффективность.

Таблица 4.4.4 Значимость коэффициентов модели множественной регрессии

	Коэффициенты	P-Значение
Y-пересечение	16300	0,042
Дата	-0,22	0,24
Ст.лд.кор.	-212	0,68
Ср Нльда(мм)	11,6	0,97
Н,лес	24,9	0,34
Н,поле	11,5	0,68
Нлдст	4,44	0,36

Наибольшей значимостью обладает Y-пересечение, что доказывает крайне низкую прогностическую эффективность. По-сути, это означает, что данное уравнение не способно описать процесс.

Однако было принято решение в целях сравнения и демонстрации преимуществ, которые дает нейронная сеть привести график прогнозов, сделанный по независимому материалу. Независимым материалом для данной модели может послужить только период за 1967-1977 год т.к. все остальные данные были использованы при расчете. К сожалению, некоторые характеристики снегозапасов отсутствовали в тот или иной год: их удалось восстановить по регрессионной зависимости.

Ниже представлен график прогнозов с использованием регрессионной зависимости, для наглядности также приведен прогноз, данный с использованием MLP 6-5-1

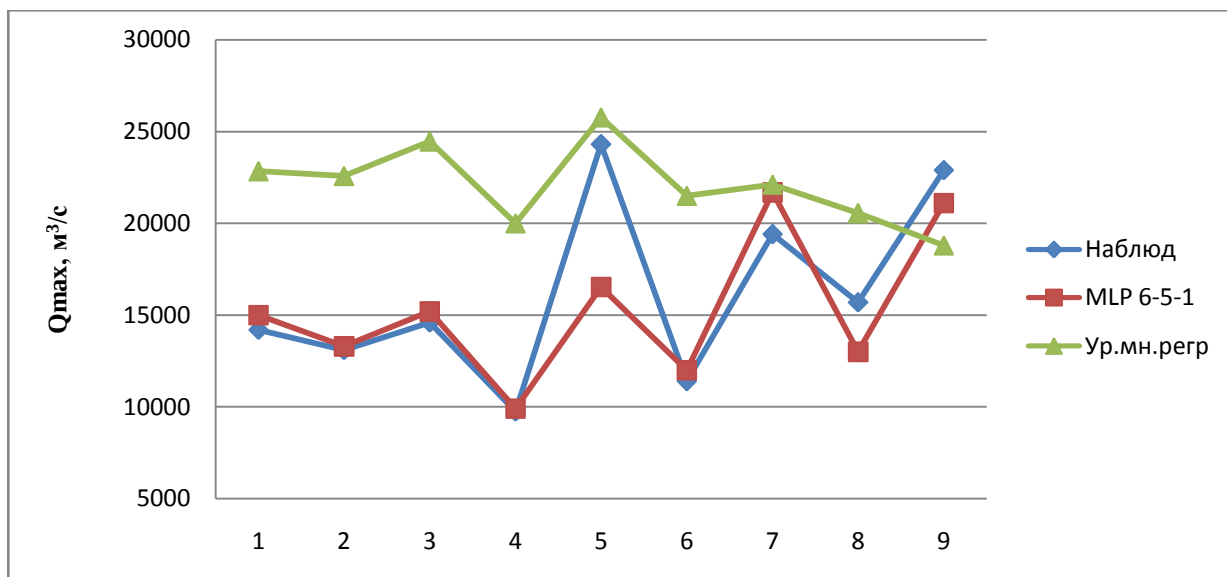


Рисунок 4.4.4 - График наблюдаемых и предсказанных значений расходов воды.

Очевидно, что уравнение множественной регрессии для прогноза не пригодно, так как предсказывает заведомо большие величины. Нейронная сеть действует более деликатно, единственная же серьезная ошибка обусловлена отсутствием четких данных по наличию ледяной корки.

Средняя абсолютная ошибка нейронной сети составляет 1500, уравнения множественной регрессии 3000, что делает результаты, полученные с использованием нейросетевых зависимостей в 2 раза лучше.

Не смотря на более короткий ряд наблюдений, использовавшийся для обучения нейронных сетей 70% от исходного (оставшиеся 30% использовались для проверки корректности работы), MLP 6-5-1 показала впечатляющие результаты. В связи с этим хочется понять причины того почему нейронная сеть полностью оправдала ожидания. Скорее всего, это связано с другим принципом действия и нахождением нелинейных зависимостей. Вполне очевидно, что зависимости между подобными величинами просто не могут быть выражены линейно – они гораздо сложнее.

Нейронная сеть в данном случае обучилась корректно и дала положительные результаты. Однако нейронные сети имеют неприятную особенность, в виду сложности зависимостей, они могут терять устойчивость

в ряде случаев и требуют постоянного контроля. Данная сеть хорошо проявила себя на тестовых выборках. Однако существует некоторая неопределенность в ее большой зависимости от наличия ледяной корки и ее толщины. К сожалению, достаточной обучающей выборки с наличием ледяной корки не существует, так же как и материалов для более детальной проверки. Таким образом, остается ряд вопросов, на которые нельзя дать однозначные ответы в данной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы была поставлена цель комплексного описания водного режима Северной Двины и ее притоков в современных условиях.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) Создана база данных, включающая как гидрологическую, так и метеорологическую информацию по бассейну Северной Двины и Северного края в целом.
- 2) На основе базы данных и информации, полученной из ресурсов поверхностных вод, климатических справочников и других источников, было выполнено физико-географическое описание изучаемой территории
- 3) По данным различной дискретности были оценены тренды и современное состояние климата
- 4) Оценены разномасштабные колебания водности рек бассейна Северной Двины в условиях изменяющегося климата
- 5) Составлены прогностические зависимости, опирающиеся на современные методы, которые подверглись критическому анализу, после данного испытания был составлен прогноз водности Северной Двины на ближайшее время.

Актуальность создания электронной базы данных заключается в том, что для рек Северо-Запада ЕТР, и для реки Северная Двина в частности, характерной особенностью периода весеннего половодья являются заторы льда, представляющие большую опасность для населения и хозяйственных объектов. Хотя заторные наводнения достаточно кратковременны, ущерб от них, как правило, намного больше ущерба от наводнений в период свободного русла.

Одной из важнейших проблем современной гидрологии является усовершенствование методов прогнозов заторных наводнений, определения зон затопления при их прохождении, разработка комплексных методов по снижению максимальных заторных уровней.

Заторные явления изучаются с конца XIX века. К настоящему времени они изучены достаточно хорошо, и существуют достаточно качественные методы их прогноза, разработанные в 70-80 – х годах прошлого века. Они успешно используются в прогностической практике Росгидромета, однако в последние годы точность их снижается.

Из опыта применения изложенных в отчёте методик прогнозов следует, что в прогностические зависимости следует вносить поправки, учитывающие климатические изменения условий заторообразования.

Методики прогнозов, в основе которых лежат прогностические зависимости, установленные статистическим путём, нуждаются в уточнении, особенно после экстремальных по условиям заторообразования лет.

Поэтому создание электронной базы данных, разработка и усовершенствование на ее основе методов прогноза этого опасного природного явления, чрезвычайно актуальны в настоящее время.

Разработанная база данных может служить:

- при уточнении уже разработанных методик, которое выполняется после прохождения на реке выдающихся половодий, обусловленных заторами льда;
- для определения статистических параметров ледовых характеристик;
- анализа рядов с целью выявления в них нарушения однородности;
- анализа влияния изменений температурного режима на перечисленные выше характеристики ледового режима;

Для составления представления о современном состоянии климата было выполнено обобщение уже имеющейся информации, а также комплексный анализ метеорологических баз данных, что позволило сделать вывод об изменении климата в сторону уменьшения его континентальности. Данные изменения не являются следствием развития производства и увеличения выбросов углекислого газа в атмосферу, согласно мнению ученых, занимающихся палеоклиматологией, климат Земли менялся в прошлом по подобному сценарию, что практически исключает возможность наличия антропогенного воздействия человека на него. Если рассматривать XX-XXI век - то есть года повсеместного распространения инструментальных наблюдений - то потепление климата начинается с 1970-1980 годов, до 1970 года наблюдается холодный период. Таким образом, потепление сопоставляется с холодным в целом XX веком. Из всего выше сказанного можно сделать вывод не об антропогенном потеплении климата, а его восстановлении до значений близких к значениям климатического оптимума. Также можно утверждать, что потепление климата Земли и Российской Федерации в частности открывает новые возможности для освоения новых, ранее неиспользуемых земель. Все это может и должно использовать при составлении экономических планов развития страны.

Потепление климата, сказавшись на водном и ледовом режиме рек, для изучения этих изменений были оценены разномасштабные колебания

водности рек и линейные тренды. Так как яркой особенностью Северной Двины и ее притоков являются заторы льда при вскрытии и весенние наводнения, был подробно рассмотрен период весеннего половодья, основными характеристиками которого являются максимальные расходы воды и ледоходные уровни. Для ледового режима характерно увеличение до 25 дней периода открытого русла, что должно учитываться при определении дат начала и конца судоходного периода. Для водного режима характерно перераспределение стока внутри года, статистически значимое уменьшение уровней летне-осенней межени на 30-40 см и увеличение уровней зимней. Уровни весеннего ледохода незначительно снижаются за счет уменьшения, в последние годы наблюдений, запасов воды в снеге, что объясняется зимними оттепелями. Перераспределение стока не смогло оказать существенного влияния на заторы льда, так как увеличение уровней осенней межени, компенсируется уменьшением максимальной толщины льда. Вероятность образования заторов льда, по-прежнему, во многом зависит от характера и порядка вскрытия рек, являясь случайным событием. Водность Северной Двины в целом снижается незначительно. С экономической точки зрения перераспределение стока внутри года носит негативный характер.

Одной из самых острых проблем гидрологии остается проблема прогнозирования речного стока. Традиционные методы исследований, по мнению Б. Ю. Виноградова, ограничены, а их возможности доведены до предела. Методы математического моделирования в нашей стране развиты плохо в силу обширности ее территории и исключительно плохого состояния гидрометеорологической сети. Методы искусственного интеллекта, распространенные повсеместно в других научных областях, в гидрологии применяются редко. Поэтому одной из задач, решенной в данной работе, была разработка методик прогнозирования различных характеристик стока, опирающихся на возможности машинного обучения, а также сравнение их с более традиционными методами: уравнениями линейной и множественной

регрессии, АРПСС. В целом, можно утверждать, что в подавляющем числе случаев результаты, полученные с использованием нейронных сетей, являются лучше других. Однако существуют некоторые ограничения и неоднозначности при использовании машинного обучения, что должно решаться при создании специализированной нейронной сети, заточенной под гидрологию. Всего в работе было разработано три методики для различных гидрологических величин: максимального ледоходного уровня, среднемесячных расходов воды и максимальных годовых расходов воды. Все методики являются успешными и имеют потенциал развития. Дополнительный предиктор, предложенный в данной работе - разница толщин льда в пункте наблюдений и течением ниже, является статистически значимым и физически обоснованным, отражая разницу прочности льда между участками.

Так как были оценены разномасштабные изменения гидрометеорологических величин, составлены прогностические долгосрочные зависимости. Можно предположить, что в ближайшие 30 лет произойдет стабилизация климата на уровне близком к оптимальному. Длительность климатических оптимумов достигает 300 лет. Водность рек будет меняться подобным образом, т.е. стабилизируется. Климатические оптимумы всегда являлись причиной возвышения цивилизации. Холодные же периоды приводили к краху и войнам. Двадцать семь лет назад великая страна раскололась. Данный раскол привел к всеобщему упадку, изменению баланса сил в мире. Сегодня Российская Федерация возрождает свой экономический и военный потенциал. Для процветания нации необходимо освоение земель, разработка новых месторождений полезных ископаемых. Всему этому, долгое время препятствовал суровый климат Севера. Сегодня изменения, происходящие в климате Земли, открывают совершенно новые возможности в освоении Европейского Севера, в связи с этим роль и

значение климатических и гидрологических исследований многократно возросла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Великанов М.А. Гидрология суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1948.- 403 с.
2. Шуляковский Л.Г. О заторах льда и заторных уровнях воды при вскрытии рек.- Метеорология и гидрология, 1951, №7, с. 45-49.
3. Карнович В.Н. Механика образования и разрушения заторов льда на реках и водохранилищах ГЭС. - В сб.: Динамика и термика рек и водохранилищ. – М.: Наука, 1984, с. 234-239.
4. Лупачев Ю.В. Особенности динамики весенних ледоходов и заторов льда в устьях Северной Двины и Печеры.- Водные ресурсы, 2001, с. 63-70.
5. Каталог заторных и зажорных участков рек СССР. Т. 1 Европейская часть СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1978, 260 с.
6. Донченко Р.В., Щеголева Е.В., Коробко А.С. Закономерности формирования и распространения заторов льда на реках СССР. – Труды ГГИ, 1982, вып. 287, с. 31-45.
7. Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 248 с.
8. Попов Е.Г. Заторы льда и проблема борьбы с ними. – Метеорология и гидрология., 1968, №8, с. 45-47.
9. Руднев А.С. Типизация заторов льда на р. Лене. Сборник работ Якутской ГМО, 1969, №2, с.63-69.
10. Чижов А.Н. О механизме формирования заторов льда и их типизация. Труды ГГИ, 1975, вып. 227, с. 3-17.
11. Берденников В.П., Шматков В.А. Натурные и лабораторные исследования образования заторов льда.- Труды IV гидрологического съезда, 1976, т. 6, с. 361-370.
12. Деев Ю.П., Попов А.Ф. Весенние заторы в русловых потоках. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 110 с.

- 13.Синотин В.И., Генкин З.А. Исследования подныривания льда под преграду. – Труды ГГИ, 1972, вып. 192, с. 37-45.
- 14.Филиппов А.М. Модельные исследования вовлечения льда под кромку ледяного покрова. – Труды ГГИ, 1973, вып. 201, с. 24-31.
- 15.Болотников Г.И. Исследование ледовых явлений на гидравлических моделях речных участков. – Труды ГГИ, 1989, вып. 345, с. 3-17.
- 16.Берденников В.П. Методы расчета давления зажорных и заторных масс льда на сооружения. – Труды ГГИ, 1967, вып. 148, с. 3-28.
- 17.Тройнин В.К. Некоторые вопросы воздействия зажорных и заторных масс льда на отдельно стоящие опоры. – Труды корд. Совещания по гидротехнике, 1970, вып. 56, с. 150-156.
- 18.Панфилов Д.Ф. Закономерности движения воды и льда в широком прямоугольном русле при сплошном ледоходе. – Метеорология и гидрология, 1968, № 8, с. 41-44.
- 19.Нежиховский Р.А., Саковская Н.П. Прогноз максимального заторного уровня воды р. Северной Двины у г. Архангельска. – Труды ГГИ, 1972, вып. 197, с. 68-96.
- 20.Нежиховский Р.А., Саковская Н.П. Прогноз максимальных заторных уровней воды рек Северной Двины и Немана. Труды ГГИ, 1075, вып. 227, с. 70-86.
- 21.Нежиховский Р.А., Саковская Н.П., Ардашева Г.В. Прогнозы максимальных заторных уровней воды в местах ежегодного образования заторов. Труды IV гидрологического съезда, 1976, т. 7, с. 345-352.
- 22.Нежиховский Р.А., Бuzин В.А. Условия образования и прогнозы заторов льда на реках. Метеорология и гидрология, 1977, № 5, с. 70-73.
- 23.Бuzин В.А., Шаночкин С.В. О возможности применения метода соответственных уровней воды для прогноза заторных максимумов на реке Лене. – Труды ГГИ, 1982, вып. 287, с. 94-97.

- 24.Бужин В.А., Шаночкин С.В. Прогнозы максимальных заторных уровней воды рек Амура и Уссури. – Труды ГГИ, 1985, вып. 309, с. 44-52.
- 25.Бужин В.А., Чачина Н.С., Шаночкин С.В. Прогнозы максимальных зазорных и заторных уровней воды рек Северной и Западной Двины.– Труды ГГИ, 1986, вып. 323, с. 19-27.
- 26.Бужин В.А. Исследования в области расчетов заторных уровней воды. – Метеорология и гидрология, 1989, №3, с. 95-101.
- 27.Бужин В.А. Методы прогноза заторных и зазорных явлений. Труды V гидрологического съезда, 1989, т. 7, с. 312-319.
- 28.Бужин В.А. Результаты расчета параметров теоретических моделей заторов льда по данным гидрометрических наблюдений. – Труды ГГИ, 1991 , вып. 354, с. 3-11.
- 29.Бужин В.А. Применение теоретических моделей заторов льда для прогноза максимальных заторных уровней воды рек севера. – Сборник работ по гидрологии. 1999, № 23, с. 108-115.
- 30.Жукова М.А. Заторы льда на реках бассейна Северного Ледовитого океана и расчет наивысших заторных уровней воды. Труды ГГИ, 1978, вып. 248, с. 129-138.
- 31.Алюшинская Н.М., Анискина Н.А., Ивашинцева Л.Д. Весенний сток рек бассейна северной Двины и его прогнозы. Труды ГГИ. 1962, вып. 97, с. 3-138.
- 32.Горошноков Е.А. Трансформация максимальных уровней весеннего половодья в устьевом участке Северной Двины. Метеорология и гидрология, 1960, №8 с.38-41.
- 33.Попов В.П. Исследования заторов льда в устьевой области Северной Двины с целью их предсказания. Изд. Северного УГМС, Архангельск, Лопатин Г.В. Ледяные заторы на реке Северной Двине. Метеорологи1980. – 122 с.

- 34.В.Н. Карнович, Т.В.Кулешова Прогноз максимальных уровней воды при заторах льда на Северной Двине – Метеорология и гидрология, 1984, № 4, с. 89 – 94.
- 35.Каинова С.А., Фролова Н. Л. Особенности ледового режима рек бассейна Северной Двины. – Труды VI конф. «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей», 2004, с. 151-154.
- 36.В.А.Бузина Факторы образования и прогноз заторов льда на реках севера европейской территории России. Метеорология и гидрология. 2010 г., № 4, с. 63-74.
- 37.Результаты исследований в области прогнозов заторов льда и весеннего половодья на реках севера и северо-запада Европейской территории России. Отчет НИР ГГИ, СПб , 2007, с.14 – 90.
- 38.Комплексные исследования русловых процессов и формирования заторов льда в узле слияния Сухона-Юг-Малая-Северная Двина с целью регулирования процессов заторообразования и разработки противопаводковых мероприятий у г. Великий Устюг, отчет ФГБУ “ГГИ”, Спб, 201..221 с].
- 39.С.В. Лебедева, А.М.Алабян, И.Н. Крыленко, Т.А. Федорова «Наводнение в устье Северной Двины и их моделирование ГЕОРИСК, 2015 №1 с.18-25.
- 40.Комплекс программ для расчета волн прорыва (БОР) Авторы: Беликов В.В., Милитеев А. Н., Кочетков В.В. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2001610638. Российское агентство по патентным и товарным знакам, 2001.
- 41.Комплекс программ для расчета речных течений (FLOOD). Авторы: Беликов В.В., Милитеев А. Н. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610941. Российское агентство по патентным и товарным знакам, 2002.

42. Георгиевский М.В., Горошкова Н.И., Полякова В.С, Голованов О.Ф. , Георгиевский Д.В. Экстремальное заторное наводнение весной 2016 г. на р. Сухоне у г. Великий Устюг (формирования, прогноз, последствия) (принята к печати в журнал «Метеорология и гидрология»
43. Алексеенко Р.Я. К вопросу о влиянии осеннего и весеннего стока льда на максимальные заторные уровни и подъемы воды. Труды ГГИ, 1989, вып. 345, с. 41-45.
44. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М., 2008. Том 1. Изменения климата. – 228 с., Том II. Последствия изменений климата. – 288 с.
45. Мелешко В.П., Голицын Г.С., Говоркова В.А. и др. Возможные антропогенные изменения климата России в XXI веке: оценки по ансамблю климатических моделей. Метеорология и гидрология, 2004, №4, с. 38-49.
46. Георгиевский В.Ю. Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории бывшего СССР.- Метеорология и гидрология , 1996, № 11, с.89-99.
47. Борщ С.В., Гинзбург Б.М. Экстремально позднее замерзание рек европейской территории России зимой 2006/07 г. и потепление климата» Метеорология и гидрология, 2009, № 4, с. 86 – 93.
48. Климатический справочник СССР, выпуск 1-34, Метеорологические данные за отдельные годы, Гидрометеиздат, 1952-1957 гг,
49. Справочник по климату СССР, выпуски 1-34, Метеорологические данные за отдельные годы, Гидрометеиздат, 1966-1970 гг,
50. Метеорологический ежемесячник СССР, выпуск 1-34, ч.2.(ежегодное издание).
51. Рожков, В.Г. Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с

- гидрометеорологическими примерами Книга 1 В.Г. Рожков.–СПб.: Гидрометеиздат 2001
52. Тьюки Дж. Анализ результатов наблюдений. Разведочный анализ Пер. с англ.–М.:Мир, 1981.
- 53 Box, George; Jenkins, Gwilym (1970). Time Series Analysis: Forecasting and Control. San Francisco: Holden-Day.
- 54 Commandeur, J. J. F.; Koopman, S. J. (2007). Introduction to State Space Time Series Analysis. Oxford University Press.
- 55 Brockwell, Peter J.; Davis, Richard A. (1991). Time Series: Theory and Methods. Springer-Verlag. p. 273.
- 56 Hyndman, Rob J; Athanasopoulos, George. "Forecasting: principles and practice". Retrieved 18 May 2015.