



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

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему **Прогнозирование расходов и
уровней воды на крупных реках**

Исполнитель Зайцева Дарья Денисовна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К.Т.Н., ДОЦЕНТ
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

К.Т.Н., ДОЦЕНТ
(ученая степень, ученое звание)

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«12» июня 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

Оглавление

	Введение	3
1	Физико-географическое описание объектов исследования	4
1.1	Река Чулым	4
1.2	Река Северная Двина	4
1.3	Река Ишим	5
2	Методы краткосрочного прогноза расходов и уровней воды на крупных реках	7
3	Формирование базы данных для исследования.....	10
3.1	Расходы воды.....	13
3.2	Уровни воды	14
4	Прогноз расходов и уровней воды по методу линейной тенденции .	17
4.1	Прогноз расходов воды	18
4.2	Прогноз уровней воды.....	27
5	Оценка эффективности прогностической методики.....	36
5.1	Зарубежные подходы.....	36
5.2	Отечественные подходы.....	37
5.3	Сравнение результатов	46
	Заключение	49
	Список использованных источников	50

Введение

Прогнозирование стока является важнейшей задачей в гидрологии. Большое количество населенных пунктов, объектов инфраструктуры и сельскохозяйственных угодий расположены в зонах, которые подвержены затоплению. Прогноз необходим не только для предупреждения и предотвращения опасных гидрологических явлений, но он также нужен и для таких отраслей народного хозяйства, как энергетика, речной транспорт, водоснабжение и прочее.

В связи с вышеизложенным целью исследования является составление краткосрочного прогноза стока на крупных реках.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Подобрать крупные реки с площадью водосбора более 100 000 км²;
2. Собрать данные о расходах и уровнях воды;
3. Построить гидрографы, выделить половодья и паводки;
4. Составить прогноз с различной заблаговременностью;
5. Оценить эффективность методики прогнозирования.

1 Физико-географическое описание объектов исследования

1.1 Река Чулым

Чулым – одна из наиболее протяженных и полноводных рек Сибири. Длина реки составляет более 1800 км, русло многорукавное. Ширина реки в верховьях составляет около 6 м, а в нижнем течении – до 25 м.

Питание происходит в основном за счет таяния снега с незначительной долей дождевых и грунтовых вод.

Чулым замерзает в конце октября – ноябре и вскрывается в апреле. Ледоход обычно происходит с заторами, половодье длится с мая по июль.

Среднемноголетний расход воды в низовьях реки составляет 785 м³/с. Водный режим представляет собой западносибирский тип с весенне-летним половодьем. Максимальный расход составляет 8220 м³/с, минимальный – 108 м³/с [1].

1.2 Река Северная Двина

Северная Двина является крупнейшей рекой Европейского севера России. Образуется путем слияния рек Сухоны и Юга. Принадлежит бассейну Северного Ледовитого океана.

Длина реки от места слияния до впадения в Двинский залив Белого моря 750 км. 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.

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.

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.

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 [2].

1.3 Река Ишим

Исток реки Ишим находится в казахстанских степях, а границу Российской Федерации он пересекает на территории Тюменской области. Здесь он течет по лесостепным участкам области. Река впадает в Иртыш в селе Усть-Ишим.

Протяженность реки Ишим составляет 2450 км, из них на территории России расположено 1050 км.

Реку окружают степные и лесостепные ландшафты. А в нижнем течении Ишим бежит уже по заболоченным лесным массивам.

Лето в бассейне реки довольно теплое, а средние температуры воздуха держатся на уровне 17 – 22 градусов тепла. Зима холодная, с преобладающими температурами воздуха 16 – 21 градус мороза. Лед на реке образуется, как правило, в ноябре и держится до середины апреля.

Ишим питает свои воды с помощью весеннего таяния снега. Сток за год более 80%. Его объем составляет 2,5 куб км, что равняется 76,0 м³/с, при скорости течения 0,1 – 0,2 м/с.

Половодье непродолжительное, но обильное. Оно длится всего 25 – 40 суток. В верховьях реки приходится на апрель-май, в низовьях на май-июнь. Случается, и с причинением материального ущерба, потому что уровень воды поднимается сильно от 6 до 12 м [3].

2 Методы краткосрочного прогноза расходов и уровней воды на крупных реках

Краткосрочные прогнозы таких гидрологических характеристик, как расходы и уровни, можно определить с заблаговременностью до 15 суток (с учетом ледовых явлений). Для безледоставного периода заблаговременность уменьшается до 10 суток.

Формирование стока на территории водосбора происходит под действием различных факторов. К таковым можно отнести климатическую составляющую данного физико-географического района, факторы подстилающей поверхности. Данные факторы находятся в постоянном взаимодействии, одни из них способствуют стеканию, другие замедляют сток и даже исключают возможность его образования.

В основе метода прогнозирования любого гидрологического явления лежит физический анализ процессов, обуславливающих данное явление. На базе метода прогнозирования разрабатываются методики, которые применимы к тому или иному водному объекту, либо к территории, которая включает в себя несколько речных бассейнов, обладающие достаточной общностью.

Оценка практической применимости и эффективности является неотъемлемой частью методики прогнозирования.

Рассматривая разнообразные физические сущности гидрологических явлений, выделяют следующие методы прогнозов:

1. Методы, основанные на исследовании закономерностей движения речного стока. В основе данного метода лежит теория движения паводочной воды, уравнения водного баланса участка реки или всей речной системы, закономерности истощения запасов воды в речной сети.

2. Методы, основанные на учете инерционности гидрологических процессов. К таким методам относится метод тенденции, который

предполагает экстраполяцию хронологического графика на несколько дней вперед. Экстраполяция может быть как линейной, так и нелинейной.

3. Методы, основанные на исследовании закономерностей формирования стока не только в русловой сети, но и на площади водосбора. Данный метод предполагает учет теплофизических процессов в зоне аэрации и на поверхности почвы. Для достижения результата могут использоваться как математически модели формирования максимального стока, так и эмпирические зависимости, которые описывают отдельные составляющие баланса. В качестве исходных данных используются материалы гидрологических и метеорологических наблюдений.

4. Методы, основанные на расчете главных составляющих водного баланса за определенный период. Теоретической основой этих методов является уравнение водного баланса. Используются для локальных и территориальных долгосрочных прогнозов весеннего стока равнинных рек и весенне-летнего стока горных рек.

5. Методы краткосрочного прогноза ледовых явлений, основанные на расчете теплообмена водной массы или ледяного покрова с окружающей средой. Метеорологические условия на период от выпуска прогноза до его осуществления оцениваются по прогнозу погоды.

6. Методы долгосрочных прогнозов, основанные на исследовании атмосферных процессов. Данные методы применяются при составлении долгосрочных прогнозов ледовых явлений. Устанавливаются также связи между характеристиками метеорологических полей северного полушария и сроками наступления ледовых явлений [4].

Прогнозирование стока по тому или иному методу следует выполнять исходя из поставленной задачи. Основная цель данной работы заключается в составлении прогноза стока на крупных реках.

Паводки образуются путем поступления в русло с разных частей водосбора воды, а также атмосферных осадков, они представляют собой длинные волны.

Форма паводочной волны зависит от метеорологических условий, а также от параметров ручной системы, она плавно и закономерно меняется во времени. Это позволяет проводить экстраполяцию величин стока на некоторый период времени, учитывая тенденцию их изменения [5].

На крупных реках паводки характеризуются плавностью и продолжительностью.

На средних реках режим обычно характеризуется пикообразностью, а спады – резкие и непродолжительные. Поэтому на средних реках прогноз стока по методу линейной тенденции будет не совсем корректный.

На малых реках данный метод не может быть использован даже при заблаговременности в один день, так как средняя продолжительность подъемов и спадов не превышает 5 – 6 дней [6].

3 Формирование базы данных для исследования

При составлении краткосрочного прогноза крупных рек были использованы материалы гидрологических наблюдений – расходы и уровни воды в реках. Данные были взяты с сайта Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [7].

В качестве объектов исследования были выбраны три крупные не зарегулированные реки, основные сведения которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные сведения об исследуемых объектах

№ п/п	Река	Пост	Код поста	Площадь водсб, км ²	Годы
1	Чулым	пгт Батурино	10331	131 000	2014 – 2019
2	Северная Двина	д. Абрамково	70066	220 000	2011 – 2016
3	Ишим	с. Ильинка	11411	130 000	2015 – 2020

По ретроспективной информации, используя пять лет наблюдений, составляется прогностическая зависимость. Прогноз дается для шестого года и сравнивается с фактическими значениями.

Сведения о расположении гидрологических постов на рассматриваемых реках приведены на рисунках 1 – 3.

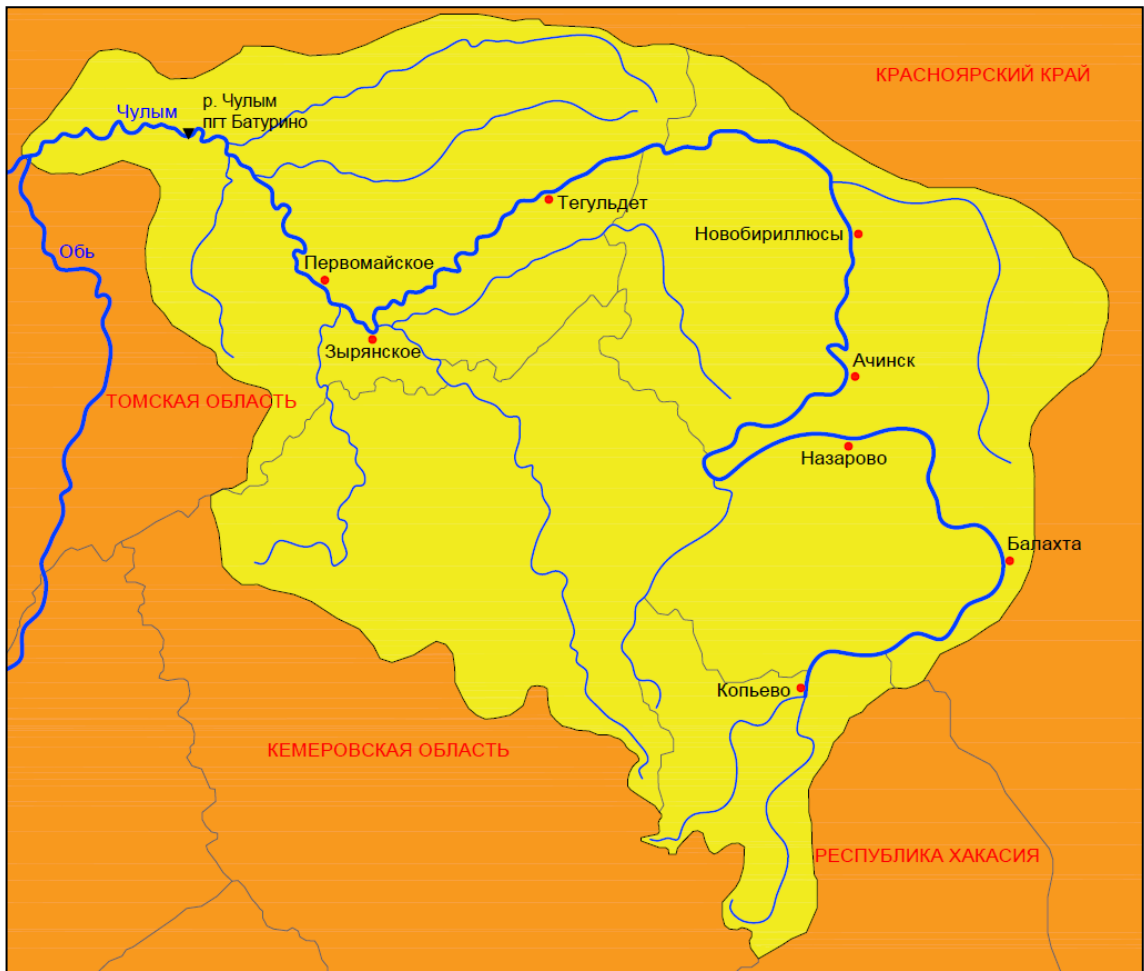


Рисунок 1 – Расположение гидрологического поста на реке Чулым.

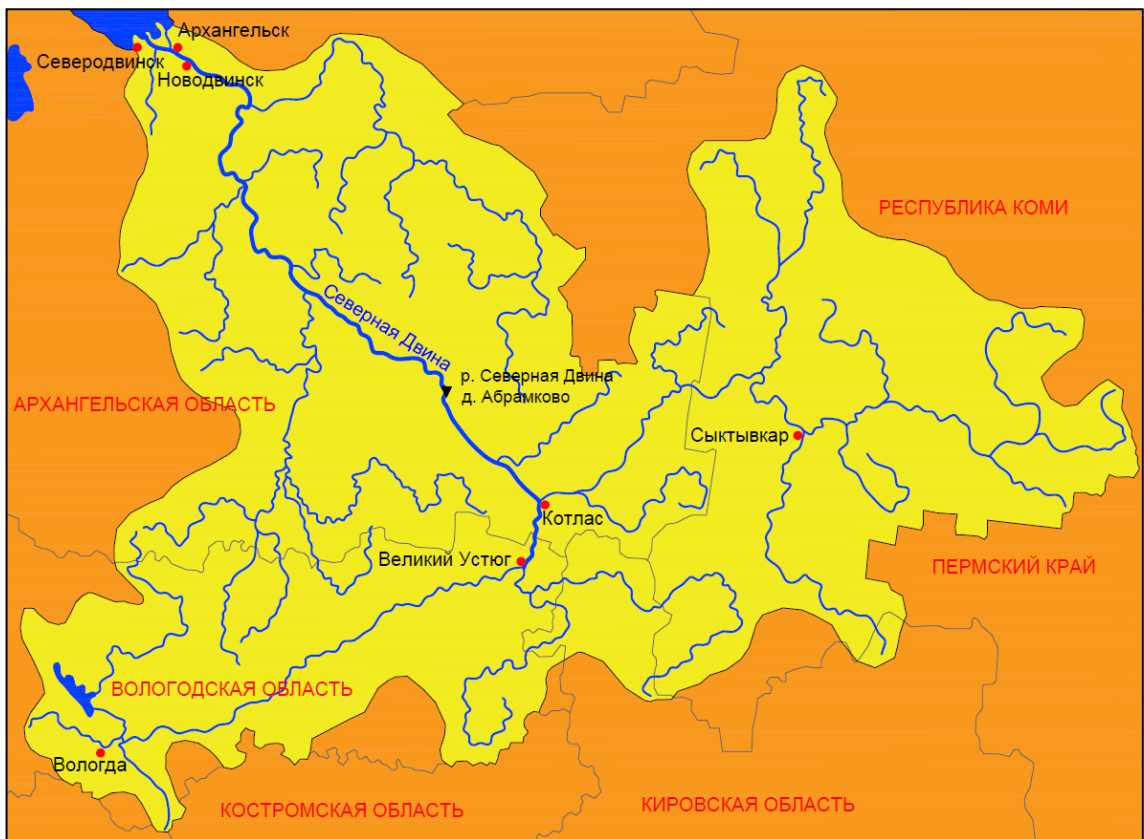


Рисунок 2 – Расположение гидрологического поста на реке Северная Двина.

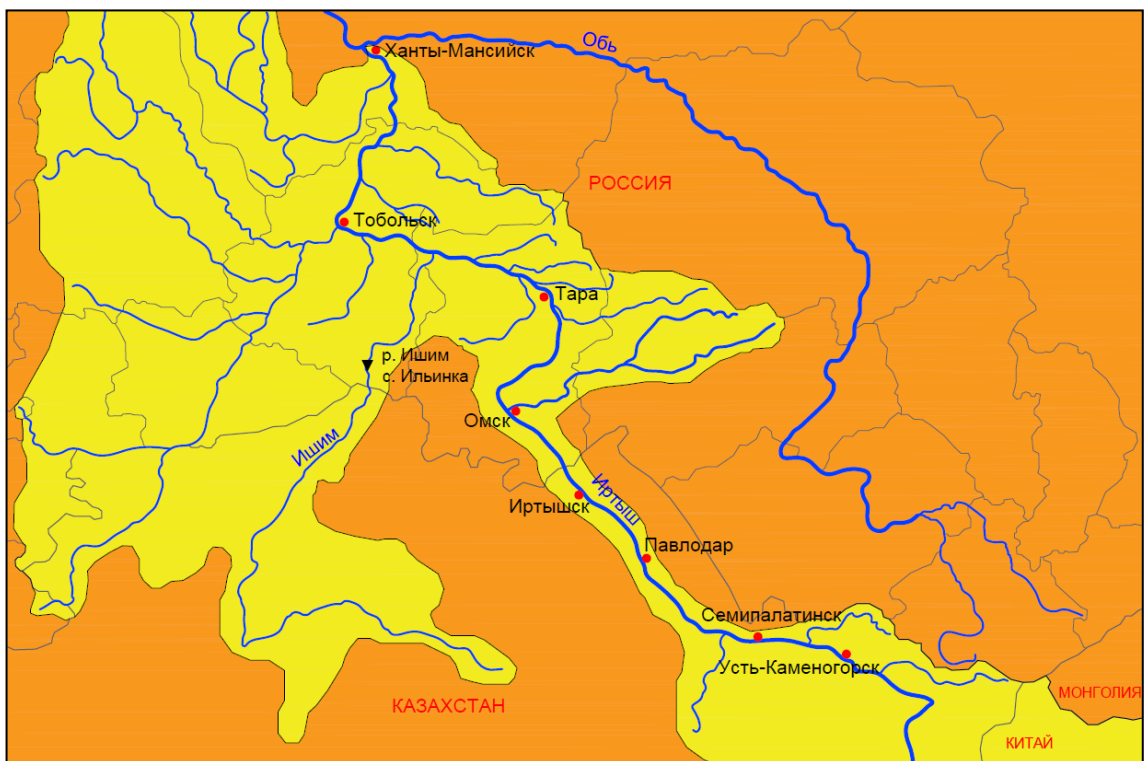


Рисунок 3 – Расположение гидрологического поста на реке Ишим.

3.1 Расходы воды

Для составления прогноза необходимы данные наблюдений за расходами воды, представленные в приложении А, расположенное на диске. Хронологические графики изображены на рисунках 4 – 6.

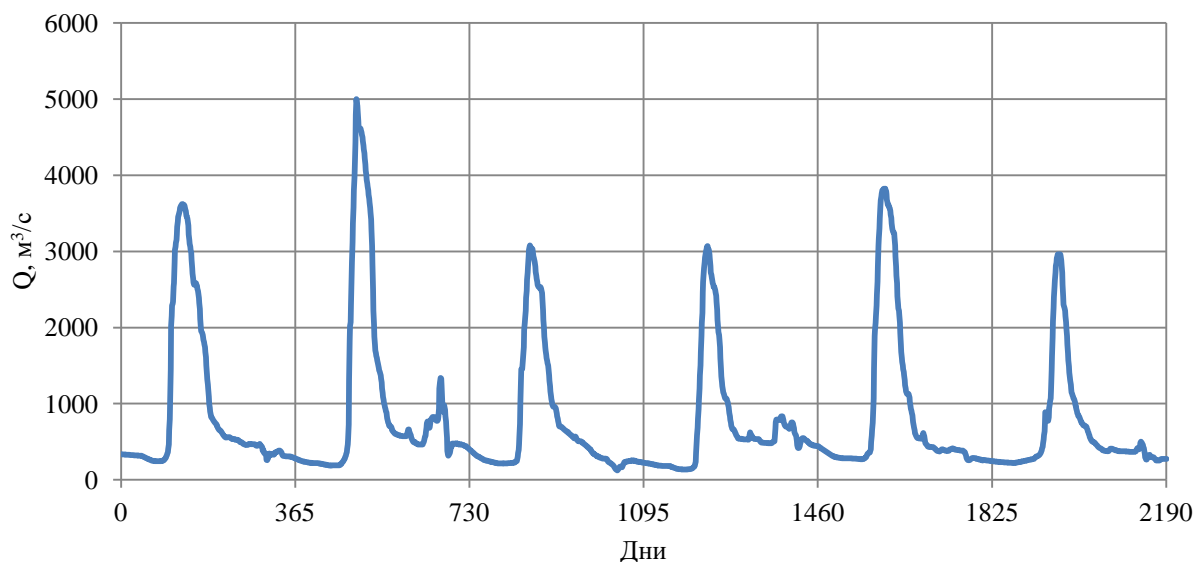


Рисунок 4 – Хронологический график ежедневных расходов воды за 2014 – 2019 годы. Река Чулым, пост пгт Батурино.

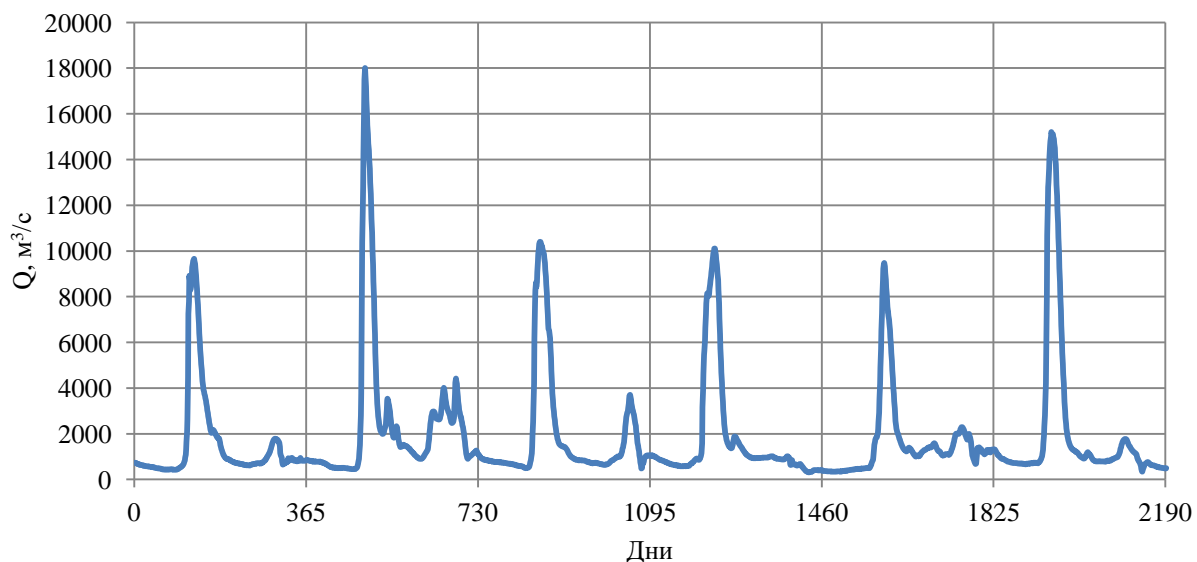


Рисунок 5 – Хронологический график ежедневных расходов воды за 2011 – 2016 годы. Река Северная Двина, пост д. Абрамково.

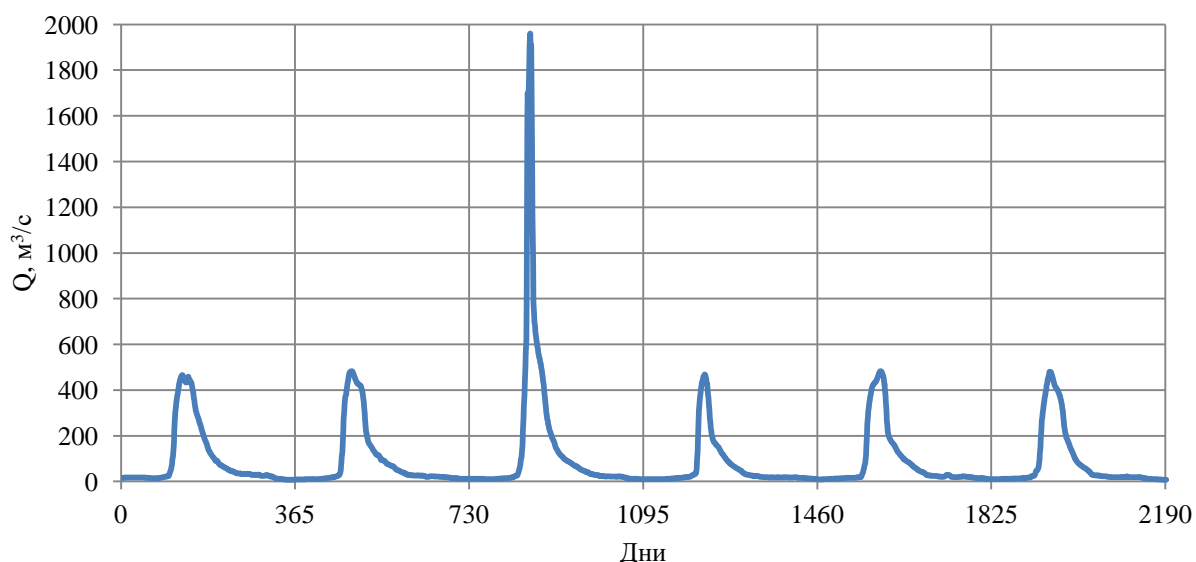


Рисунок 6 – Хронологический график ежедневных расходов воды за 2015 – 2020 годы. Река Ишим, пост д. Ильинка.

За каждый год на хронологическом графике выделялись периоды, относящиеся к весеннему половодью и дождевым паводкам. Дальнейшая обработка производилась для выделенных периодов.

3.2 Уровни воды

За те же годы, за которые были взяты данные по расходам воды на исследуемых реках, были получены данные об ежедневных уровнях воды. Хронологические графики приведены на рисунках 7 – 9.

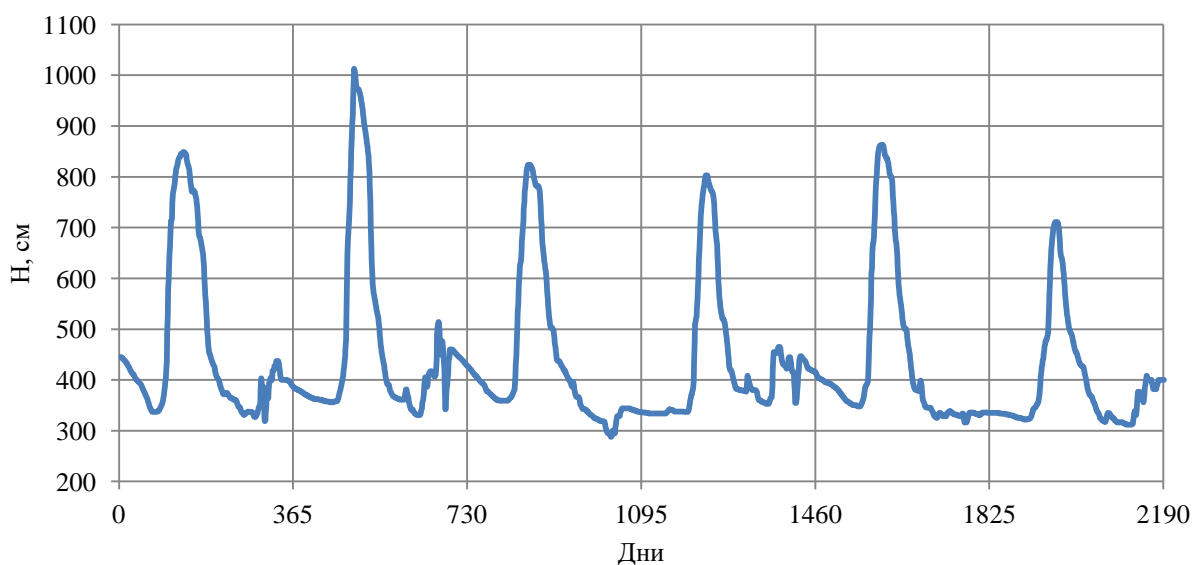


Рисунок 7 – Хронологический график ежедневных уровней воды за 2014 – 2019 годы. Река Чулым, пост пгт Батурино.

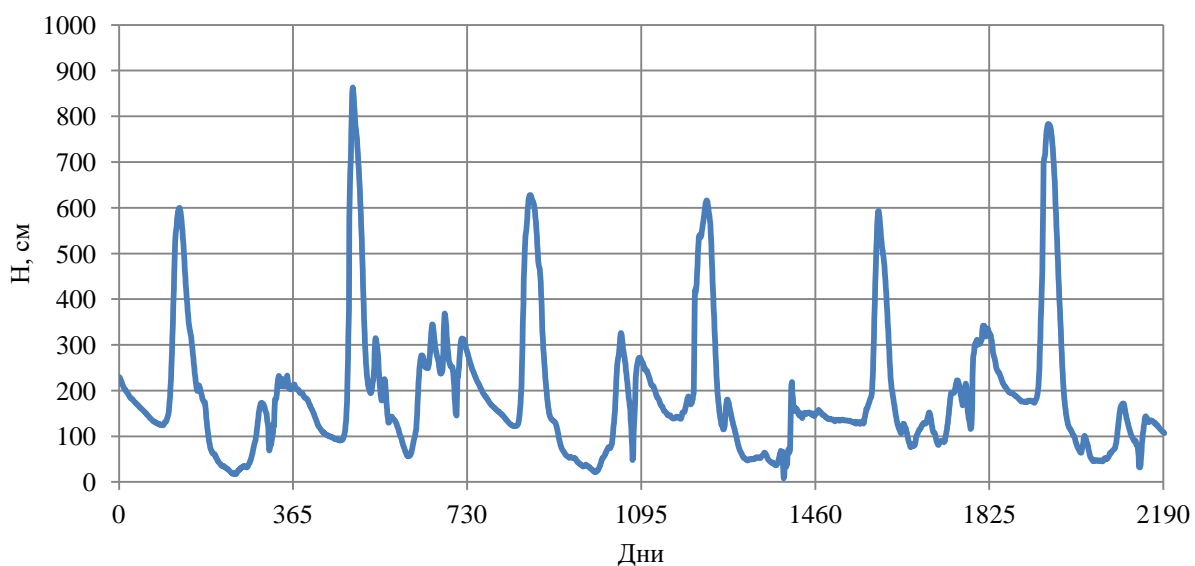


Рисунок 8 – Хронологический график ежедневных уровней воды за 2011 – 2016 годы. Река Северная Двина, пост д. Абрамково.

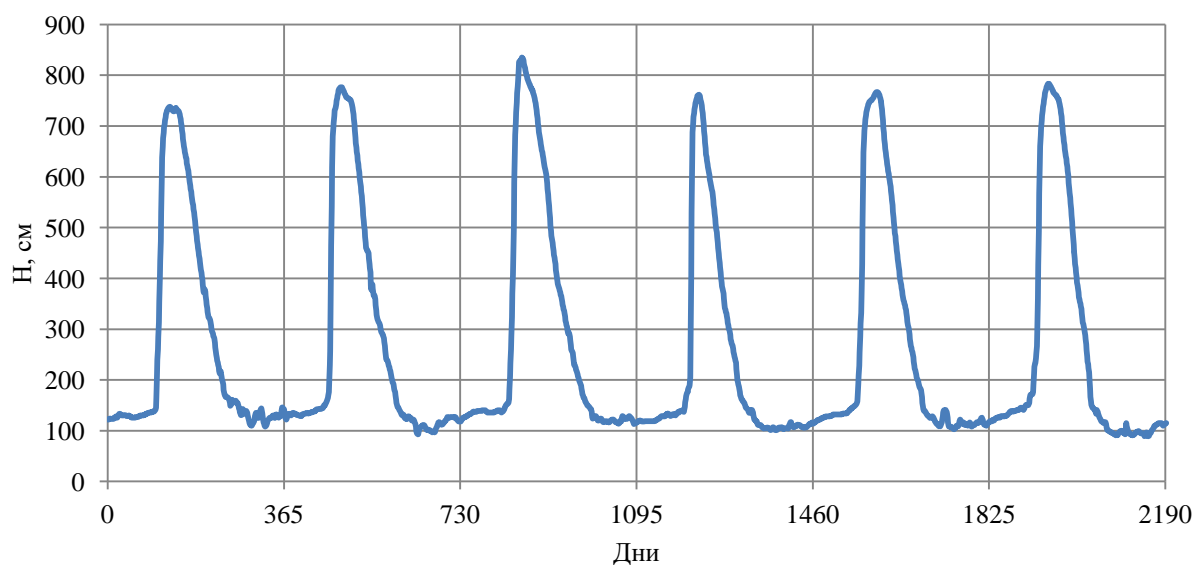


Рисунок 9 – Хронологический график ежедневных уровней воды за 2015 – 2020 годы. Река Ишим, пост д. Ильинка.

Аналогично расходам воды, для составления прогноза выделялись периоды с половодьем и дождевыми паводками.

Гидрографы уровней воды более изменчивы, график расходов воды имеет более плавный вид, так как расходы снимаются с кривой $Q = f(H)$, куда уже вносится осреднение.

4 Прогноз расходов и уровней воды по методу линейной тенденции

Метод линейной тенденции основан на использовании инерционности в гидрологических явлениях. Предполагается, что тенденция, которая существует в момент выпуска прогноза, сохраняется в течение некоторого периода времени. Таким образом, данное свойство позволяет применять методы экстраполяции хода уровней и расходов воды по тенденции их изменения на некоторое время вперед. Экстраполяция производится по прямой линии, наклон которой равен среднему наклону предшествующего дате выпуска прогноза отрезка хода гидрологической величины. Один из приемов основывается на использовании связи между приращениями стока воды за короткий и более длительный интервалы времени. Такая экстраполяция на небольшой период дает неплохие результаты для крупных рек. При увеличении заблаговременности формальная экстраполяция может приводить к нереальным результатам [5].

Иллюстрация метода линейной тенденции представлена на рисунке 1.

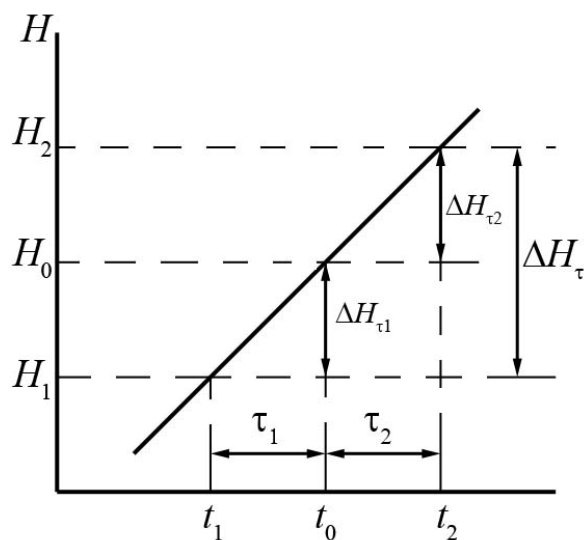


Рисунок 10 – Иллюстрация метода линейной тенденции.

При прогнозировании по методу линейной тенденции используют следующие уравнения:

$$X_{t_2} = X_{t_0} + \Delta X_{\tau_2}, \quad \text{где } \Delta X_{\tau_2} = f(\Delta X_{\tau_1}) \quad (1)$$

или

$$X_{t_2} = X_{t_1} + \Delta X_{\tau}, \quad \text{где } \Delta X_{\tau} = f(\Delta X_{\tau_1}) \quad (2)$$

где X – гидрологическая величина;

t_0 – дата выпуска прогноза;

t_2 – дата, на которую составляется прогноз;

ΔX_{τ_1} , ΔX_{τ_2} , ΔX_{τ} – изменение гидрологической величины за период τ_1 , τ_2 и τ .

Для составления прогноза по данным уравнениям, необходимо построить графические зависимости по материалам гидрометрических наблюдений. Величины τ_1 и τ_2 устанавливаются заранее исходя из требуемой заблаговременности и допустимой точности прогнозов. Для весеннего половодья и дождевых паводков троятся отдельные зависимости. В настоящей работе представлены зависимости двухсуточных, трехсуточных и семисуточных изменений от односуточных.

4.1 Прогноз расходов воды

Результатом составления прогноза расходов воды являются совмещенные гидрографы фактических и прогнозных значений расходов воды, которые представлены на рисунках 12 – 16 .

Пример расчетных таблиц, а также график связи односуточных изменений от трехсуточных приведен на рисунке 11.

Допустимые погрешности приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Допустимые погрешности при прогнозировании расходов воды

τ	Река	дпоп, м³/с	
		Половодье	Паводки
2	Чулым	99	58
	Сев. Двина	480	96
	Ишим	58	-
3	Чулым	268	154
	Сев. Двина	1380	286
	Ишим	85	-
7	Чулым	494	175
	Сев. Двина	2600	550
	Ишим	138	-

Табл.1. Сводная таблица допустимых величин расходов воды в весеннее половодье у Чулыма - от Ветрухи

№ п/п	Дата	Q, м³/с	Наименование расхода				Отклоненность
			Q _{исп.}	Q _{пр.}	(Q _{исп.} -Q _{пр.})/Q	τ	
1	07.04.14	342					
2	08.04.14	381	20	120	12412	-	
3	09.04.14	451	40	200	7133	-	
4	10.04.14	485	60	320	14413	-	
5	11.04.14	651	100	480	26084	-	
6	12.04.14	707	140	700	61133	-	
7	13.04.14	1030	230	1220	149111	-	
8	14.04.14	1400	400	1100	110984	-	
9	15.04.14	2020	700	840	88048	-	
10	16.04.14	2155	130	250	8052	-	
11	17.04.14	2090	155	180	20071	-	
12	18.04.14	2311	20	300	58600	-	
13	19.04.14	2340	20	265	64217	-	
14	20.04.14	2540	200	210	24814	-	
15	21.04.14	2280	40	480	110409	-	
16	22.04.14	2850	270	480	219409	-	
17	23.04.14	3030	170	260	67538	-	
18	24.04.14	3080	40	130	18031	-	
19	25.04.14	3130	50	160	22054	-	
20	26.04.14	3150	40	210	39547	-	
21	27.04.14	3200	70	240	51171	-	
22	28.04.14	3320	100	310	47103	-	
23	29.04.14	3390	70	180	22058	-	
24	30.04.14	3450	70	150	8881	-	
25	01.05.14	3480	30	90	4880	-	
26	02.05.14	3500	20	90	8148	-	
27	03.05.14	3530	30	90	8148	-	
28	04.05.14	3570	40	70	3452	-	
29	05.05.14	3580	20	40	807	-	
30	06.05.14	3600	10	20	239	-	
31	07.05.14	3610	10	20	71	-	
32	08.05.14	3620	10	0	134	-	
33	09.05.14	3630	0	-10	468	-	
34	10.05.14	3610	-10	-10	468	-	
35	11.05.14	3610	0	-10	468	-	
36	12.05.14	3610	0	-10	1730	-	
37	13.05.14	3600	-10	-70	6957	-	
38	14.05.14	3580	-20	-70	6957	-	
39	15.05.14	3540	-40	-120	17316	-	
40	16.05.14	3530	-10	-60	8339	-	
41	17.05.14	3480	-70	-100	12452	-	
42	18.05.14	3480	0	-90	1107	-	
43	19.05.14	3430	-30	-120	17316	-	
44	20.05.14	3400	-20	-110	49102	-	
45	21.05.14	3340	-60	-180	88439	-	
46	22.05.14	3230	-100	-240	6767	-	
47	23.05.14	3150	-70	-100	28443	-	
48	24.05.14	3100	-20	-120	2867	-	
49	25.05.14	3080	-40	-120	17316	-	
50	26.05.14	3020	-40	-170	12975	-	
51	27.05.14	2980	-60	-240	83397	-	
52	28.05.14	2890	-80	-270	9282	-	

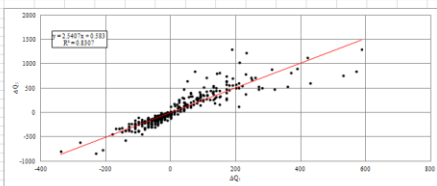


Рис.1. Расчетная зависимость дпоп = f(Qпр)

Табл.2. Прогноз расходов воды весеннее половодье у Чулыма - от Ветрухи

д/м	Q, м³/с	Q _{исп.}	Q _{пр.}	Отр.	ГТМ	ГТМ	Средн.	Отклоненность	δ²
01.05.14	3450	3400	3450	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
02.05.14	3500	3450	3500	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
03.05.14	3530	3480	3530	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
04.05.14	3570	3520	3570	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
05.05.14	3580	3530	3580	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
06.05.14	3600	3540	3600	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
07.05.14	3610	3550	3610	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
08.05.14	3620	3560	3620	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
09.05.14	3630	3570	3630	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
10.05.14	3610	3550	3610	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
11.05.14	3610	3550	3610	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
12.05.14	3610	3550	3610	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
13.05.14	3600	3540	3600	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
14.05.14	3580	3520	3580	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
15.05.14	3540	3480	3540	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
16.05.14	3530	3470	3530	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
17.05.14	3480	3420	3480	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
18.05.14	3480	3420	3480	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
19.05.14	3430	3370	3430	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
20.05.14	3400	3340	3400	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
21.05.14	3340	3280	3340	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
22.05.14	3230	3170	3230	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
23.05.14	3150	3090	3150	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
24.05.14	3100	3040	3100	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
25.05.14	3080	3020	3080	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
26.05.14	3020	2960	3020	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
27.05.14	2980	2920	2980	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
28.05.14	2890	2830	2890	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
29.05.14	2800	2740	2800	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01
30.05.14	2270	2210	2270	0	1	0.9991	-0.1	-	0.01

Рисунок 11 – Пример расчетных таблиц (река Чулым, весеннее половодье. Заблаговременность τ = 3 сут).

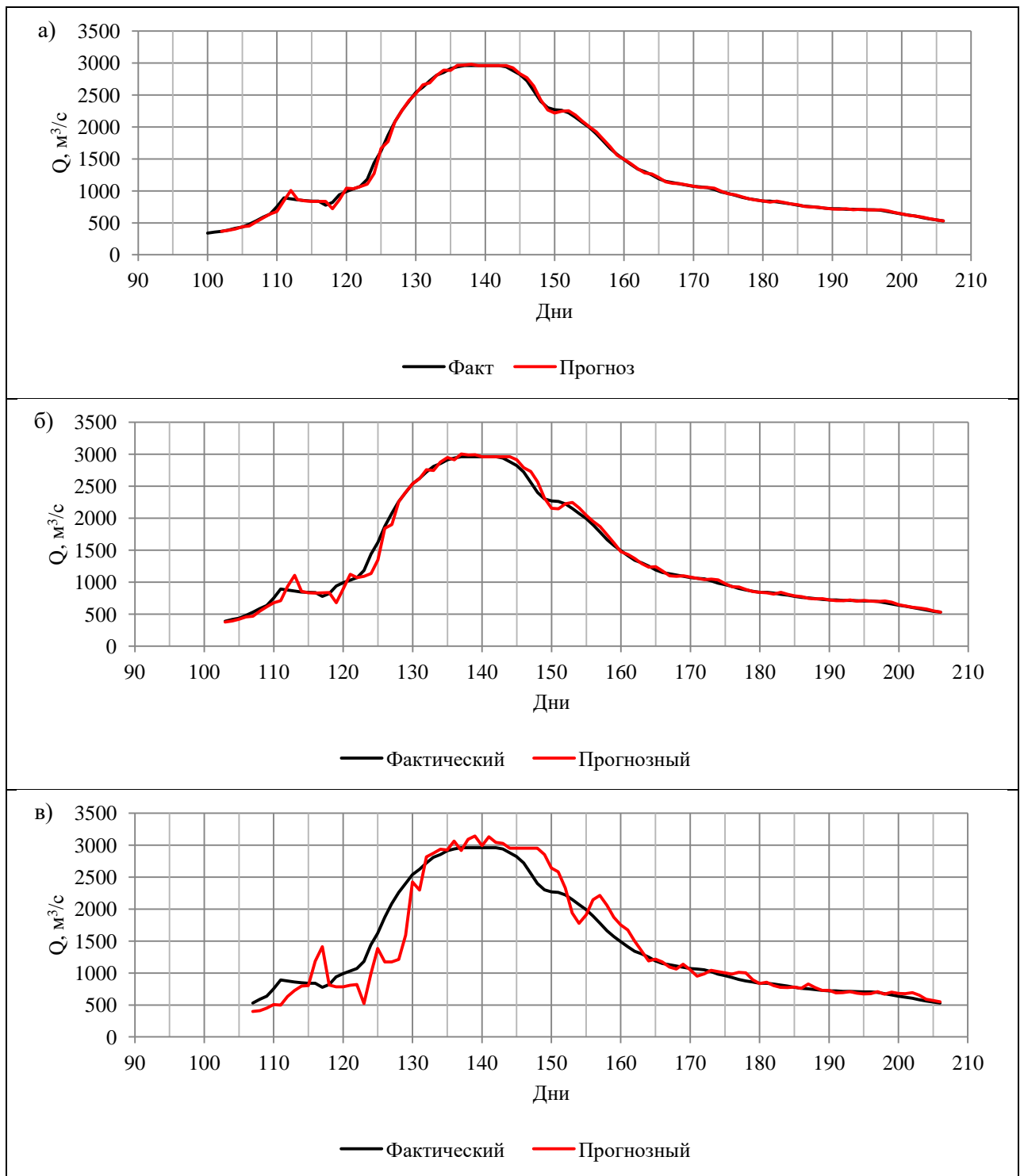


Рисунок 12 – Фактические и прогнозные гидрографы расходов весеннего половодья, река Чулым (а – заблаговременность $\tau = 2$, б – заблаговременность $\tau = 3$, в – заблаговременность $\tau = 7$).

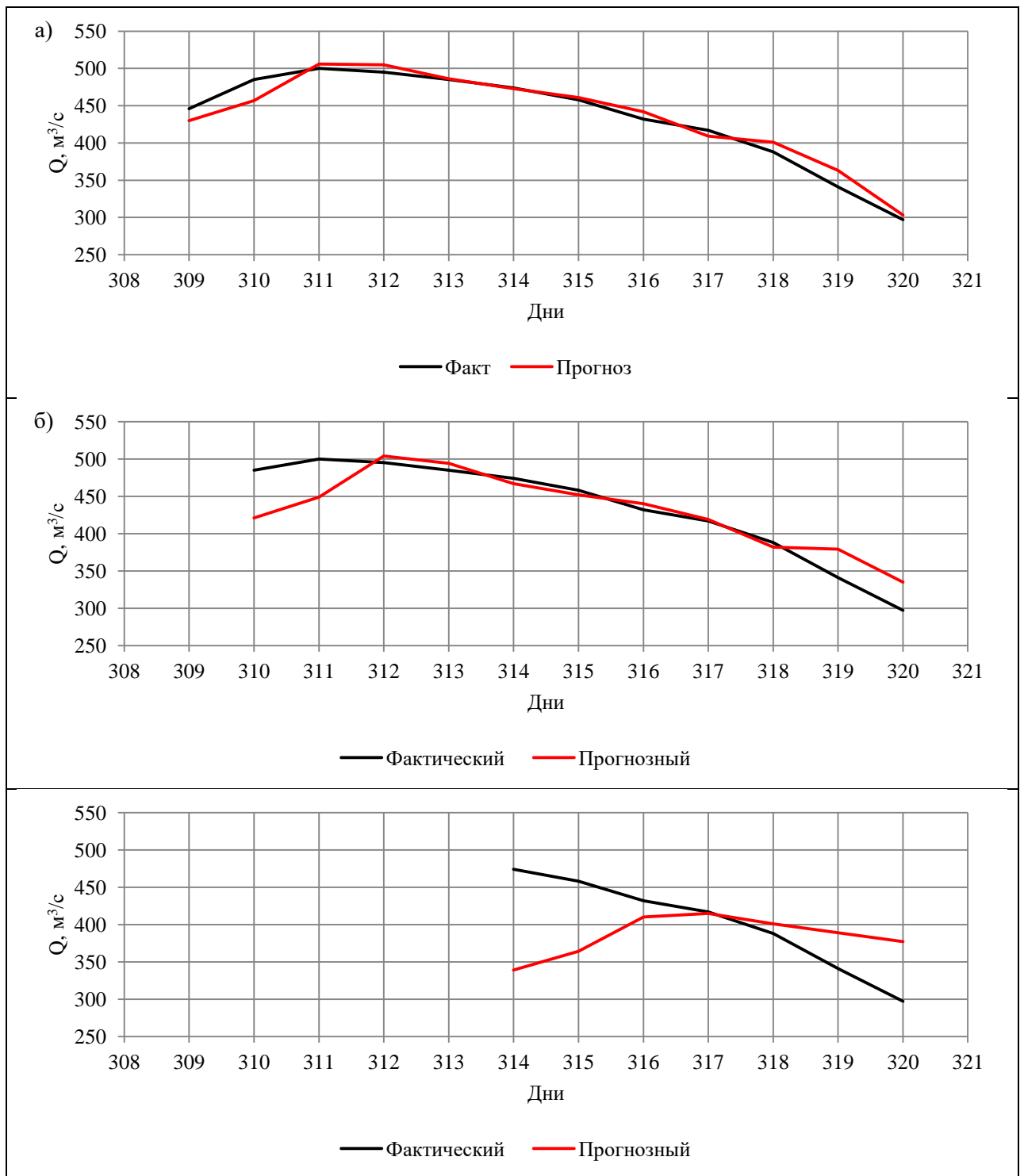


Рисунок 13 – Фактические и прогнозные гидрографы расходов дождевых паводков, река Чулым (а – заблаговременность $\tau = 2$, б – заблаговременность $\tau = 3$, в – заблаговременность $\tau = 7$).

Как видно из рисунка 12а, при заблаговременности, равной двум суткам, прогнозный гидрограф полностью повторяет ход фактических значений. Наибольшие отклонения наблюдаются 22 апреля (112 день от начала года), полученное значение на $132 \text{ м}^3/\text{с}$ превышает фактическое.

На рисунке 12б заблаговременность была увеличена до трех суток. Наибольшее отклонение прогнозных значений от фактических наблюдается на подъеме половодья, на спаде данная ошибка не превышает 5%.

Прогнозный гидрограф, представленный на рисунке 11в, имеет значительные отклонения от фактического гидрографа. Связано это с большой заблаговременностью прогноза, равной семи суткам.

На рисунке 13 представлены гидрографы расходов дождевых паводков. На рисунке 13а 6 ноября (310 день от начала года) наблюдается наибольшее различие между фактическим и прогнозным значением, разница составила $28 \text{ м}^3/\text{с}$. Все прогнозы оправдываются по методу ГГИ, так как отклонения не превышают допустимую погрешность.

При заблаговременности, равной трем суткам (рисунок 13б), наибольшее отклонение также наблюдается 6 ноября. В конце спада дождевого паводка прогнозные значения превышают фактические значения, не превышая при этом пределы допустимой погрешности, таким образом, все прогнозы считаются оправдавшимися.

Составляя прогноз на семь суток вперед, можно отметить, что прогнозные значения не соответствуют фактическим. В начале паводка полученные значения получились заниженными, а в конце спада – завышенными. Из-за малой продолжительности паводка составление прогноза с заблаговременностью семь суток является некорректным.

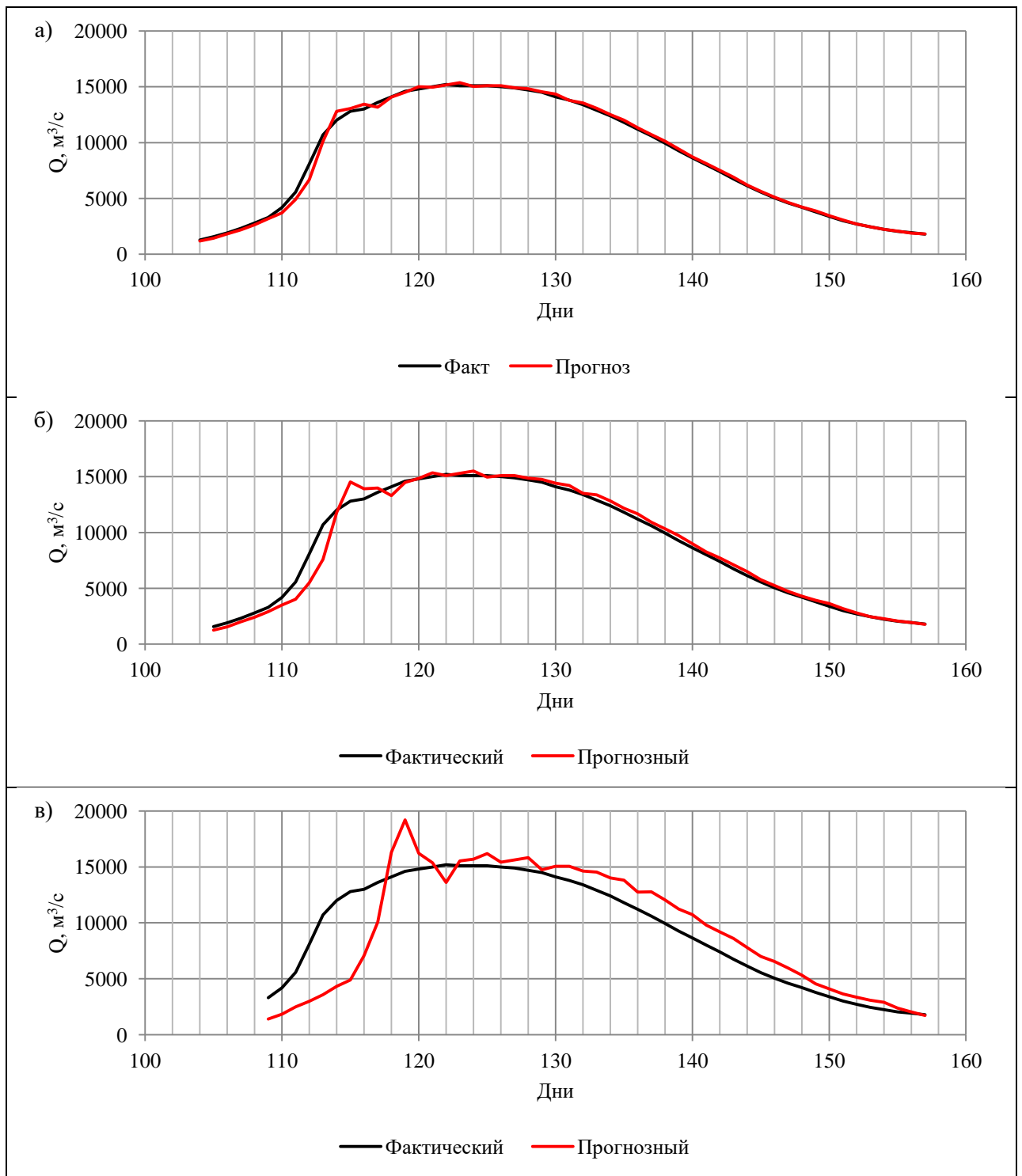


Рисунок 14 – Фактические и прогнозные гидрографы расходов весеннего половодья, река Северная Двина (а – заблаговременность $\tau = 2$, б – заблаговременность $\tau = 3$, в – заблаговременность $\tau = 7$).

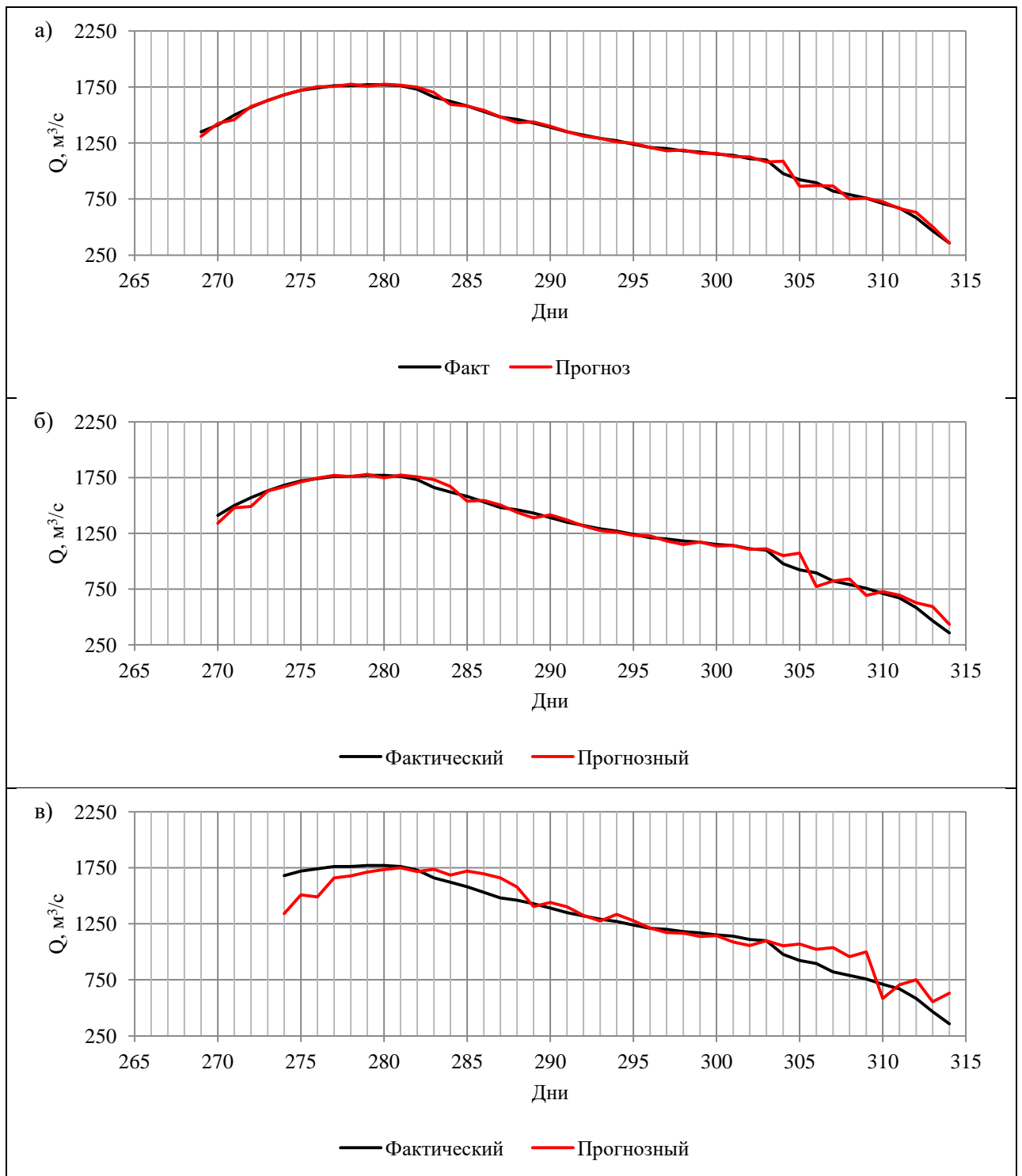


Рисунок 15 – Фактические и прогнозные гидрографы расходов дождевых паводков, река Северная Двина (а – заблаговременность $\tau = 2$, б – заблаговременность $\tau = 3$, в – заблаговременность $\tau = 7$).

Прогнозный гидрограф расходов весеннего половодья, представленный на рисунке 14а, повторяет ход фактических расходов воды. Минимальные отклонения от фактических значений приходятся на спад половодья.

При увеличении заблаговременности (рисунок 14б) отклонения от фактических значений увеличиваются. Максимальная разница между фактическим и прогнозным значениями составляет $3100 \text{ м}^3/\text{с}$ (22 апреля, 113 день). На спаде половодья все прогнозные значения превышают фактические, но не выходят за общие границы погрешностей.

При заблаговременности 7 суток (рисунок 14в) в начале половодья прогнозные значения значительно ниже фактических, наибольшее отклонение наблюдается 24 апреля (115 день) и составляет $7900 \text{ м}^3/\text{с}$. 28 апреля на прогнозном гидрографе четко выражен пик, значение расхода в этот день составляет $19200 \text{ м}^3/\text{с}$.

На рисунках 15а и 15б прогнозные гидрографы повторяют ход фактического гидрографа. При заблаговременности 3 дня отклонения от фактических значений несколько больше, чем при заблаговременности 2 дня. Наибольшая разница в значениях наблюдается в 304 – 307 дни (30 октября – 2 ноября) и на рисунке 15а, и на рисунке 15б.

На рисунке 15в прогнозные значения в целом повторяют ход фактических значений. Отклонения наблюдаются как в начале, так и в конце половодья. Все прогнозы оправдываются и по методу ГГИ, и по методу ГМЦ.

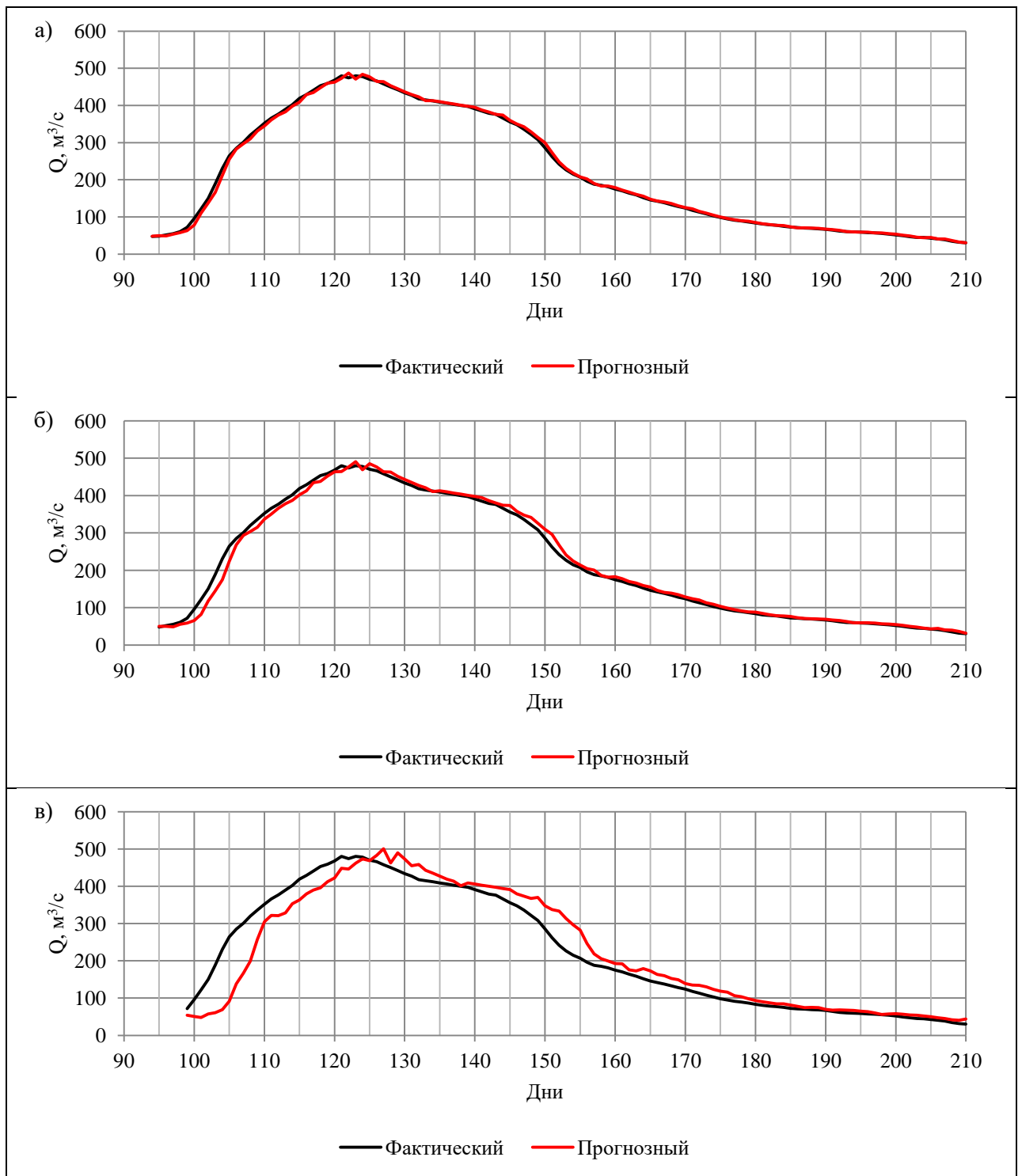


Рисунок 16 – Фактические и прогнозные гидрографы расходов весеннего половодья, река Ишим (а – заблаговременность $\tau = 2$, б – заблаговременность $\tau = 3$, в – заблаговременность $\tau = 7$).

Анализируя рисунок 16а, можно сказать, что фактические и прогнозные гидрографы схожи между собой, различия между ними минимальные.

На рисунке 16б появляется некая смещенность в значениях, прогнозный гидрограф повторяет ход фактических значений, но со сдвигом по времени.

Увеличивая заблаговременность (рисунок 16в), прогнозный гидрограф имеет большую смещенность, поэтому выполненный прогноз нельзя считать корректным.

4.2 Прогноз уровней воды

Прогнозирование уровней воды весеннего половодья и дождевых паводков выполняется аналогично тому, как был выполнен прогноз расходов воды. Результаты представлены на рисунках 17 – 21.

Допустимые погрешности для уровней воды представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Допустимые погрешности при прогнозировании уровней воды

τ	Река	δдоп, см	
		Половодье	Паводки
2	Чулым	12	11
	Сев. Двина	20	11
	Ишим	16	-
3	Чулым	33	27
	Сев. Двина	56	27
	Ишим	44	-
7	Чулым	69	32
	Сев. Двина	100	47
	Ишим	93	-

Как видно из таблицы 3, при увеличении заблаговременности величина допустимой погрешности растет.

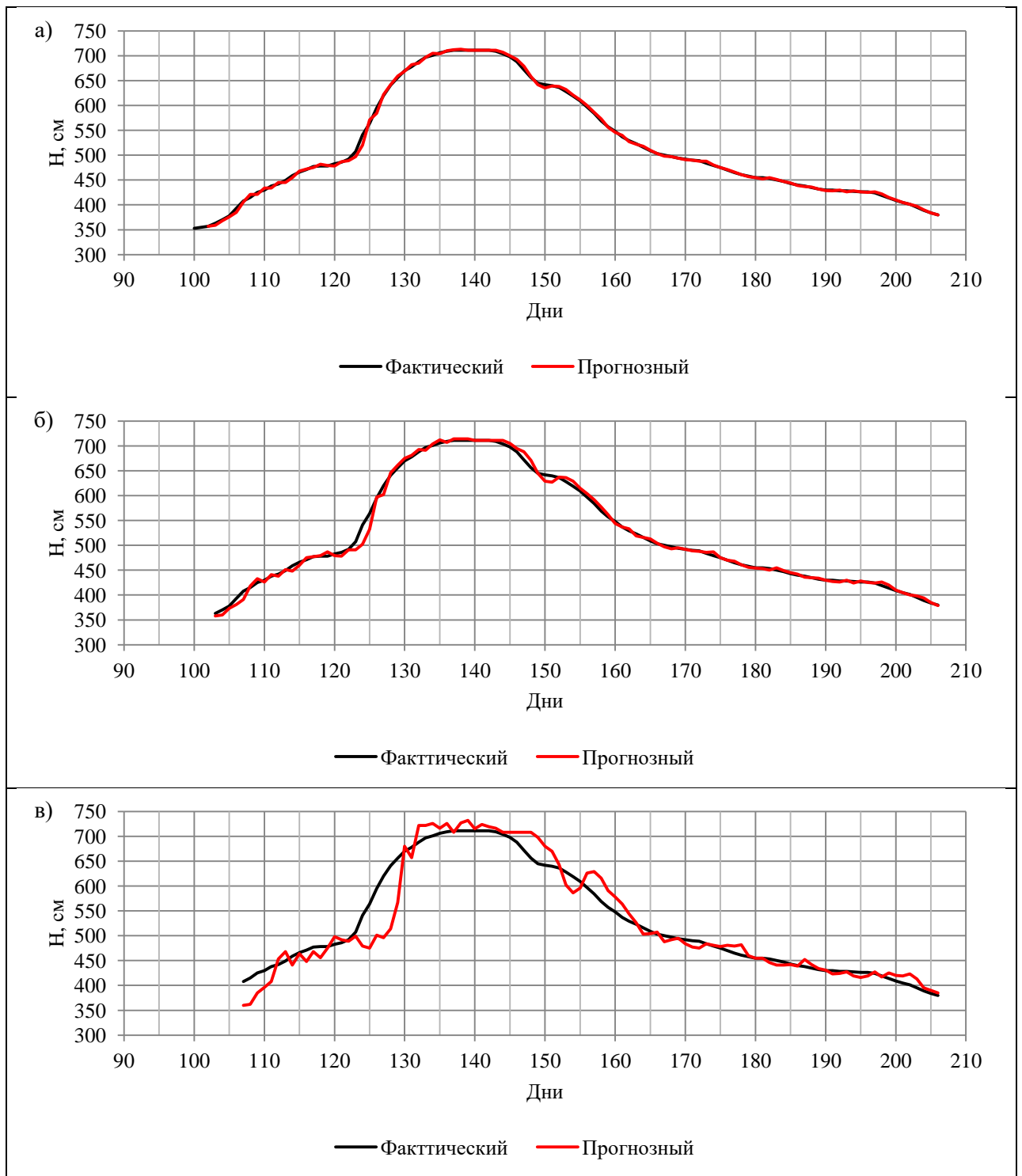


Рисунок 17 – Фактические и прогнозные гидрографы уровней весеннего половодья, река Чулым (а – заблаговременность $\tau = 2$, б – заблаговременность $\tau = 3$, в – заблаговременность $\tau = 7$).

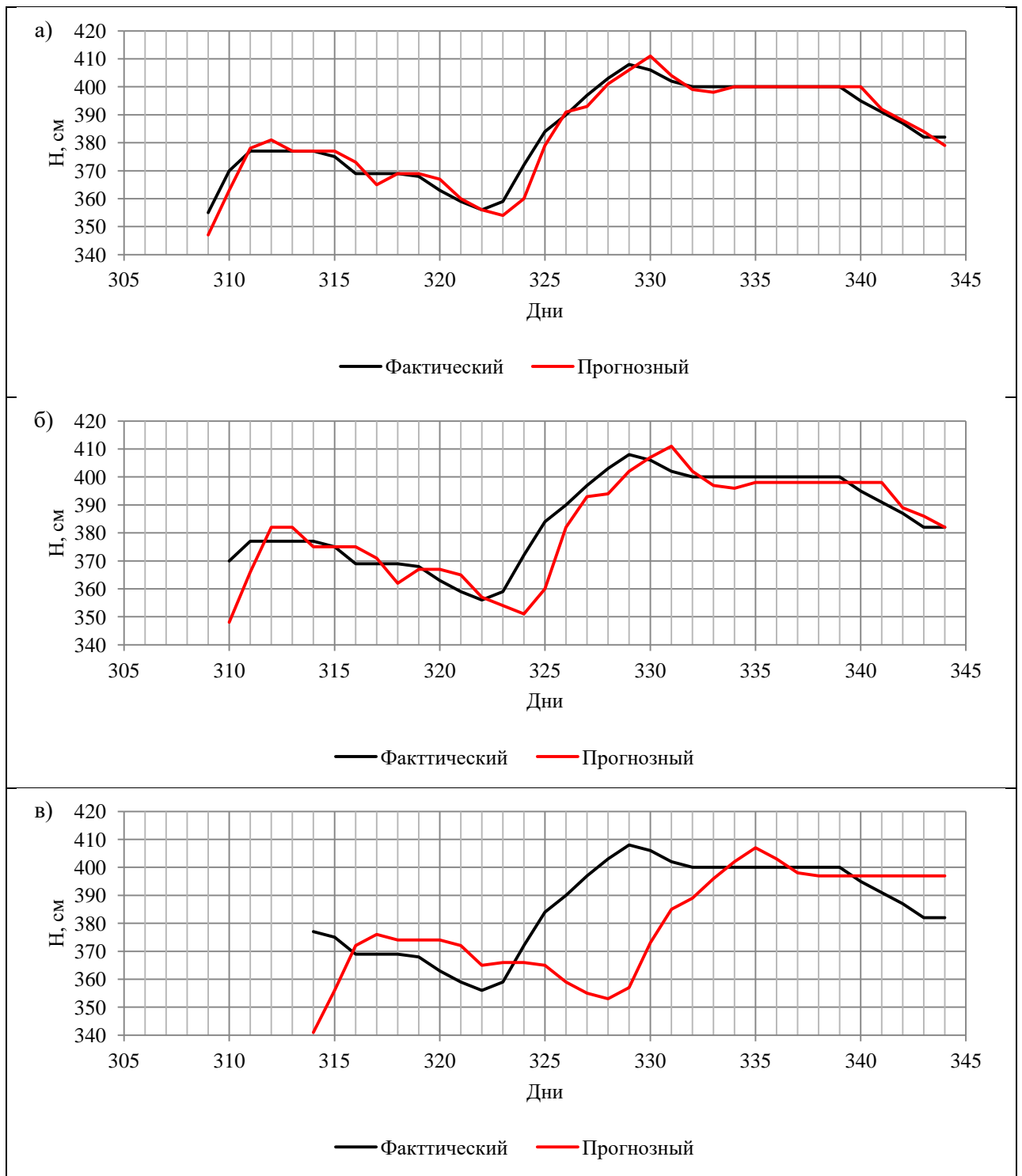


Рисунок 18 – Фактические и прогнозные гидрографы уровней дождевых паводков, река Чулым (а – заблаговременность $\tau = 2$, б – заблаговременность $\tau = 3$, в – заблаговременность $\tau = 7$).

Прогнозный гидрограф, представленный на рисунке 17а, полностью повторяет ход фактических значений уровней воды. При увеличении заблаговременности появляются небольшие отклонения от фактических значений. Наибольшая разность между значениями наблюдается 4 мая, фактическое значение уровня воды составляет 541 см, а прогнозное – 502 см.

Увеличив заблаговременность до семи суток, прогнозные значения сильно отличаются от фактических. На спаде половодья прогнозные значения в целом схожи с фактическими.

На рисунке 18а представлен прогнозный и фактический гидрографы, отклонение прогнозного гидрографа от фактического в среднем составляет 2 см. Максимальная разница наблюдается 20 ноября, фактическое значение выше прогнозного на 12 см.

Смещенные значения наблюдаются при увеличении заблаговременности. Наибольшая ошибка определения уровня воды при заблаговременности, равной трем суткам, составляет 24 см и наблюдается 21 ноября.

При заблаговременности, равной семи суткам, прогнозные значения смещены на шесть дней, поэтому прогноз при такой заблаговременности считается некорректным.

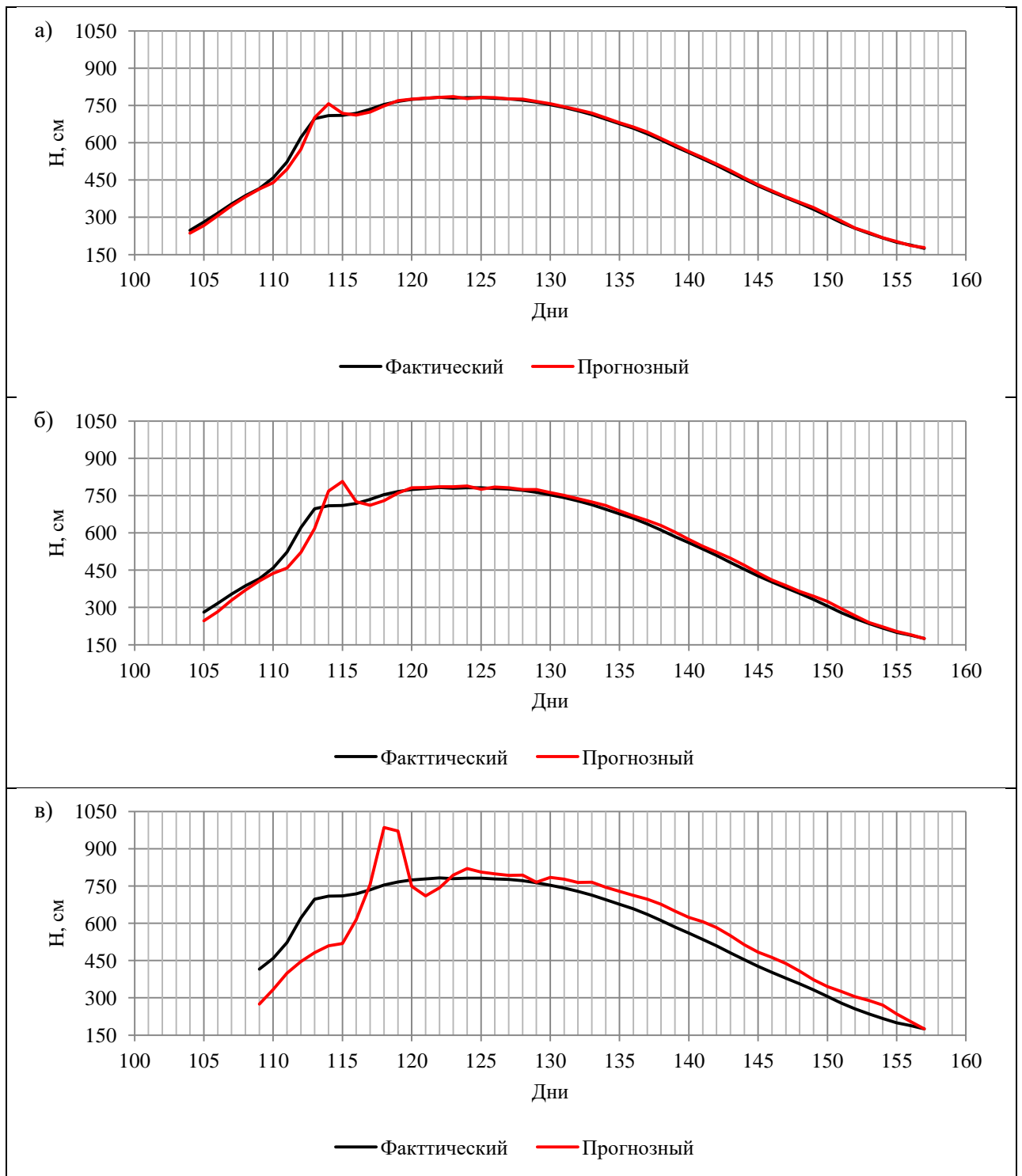


Рисунок 19 – Фактические и прогнозные гидрографы уровней весеннего половодья, река Северная Двина (а – заблаговременность $\tau = 2$, б – заблаговременность $\tau = 3$, в – заблаговременность $\tau = 7$).

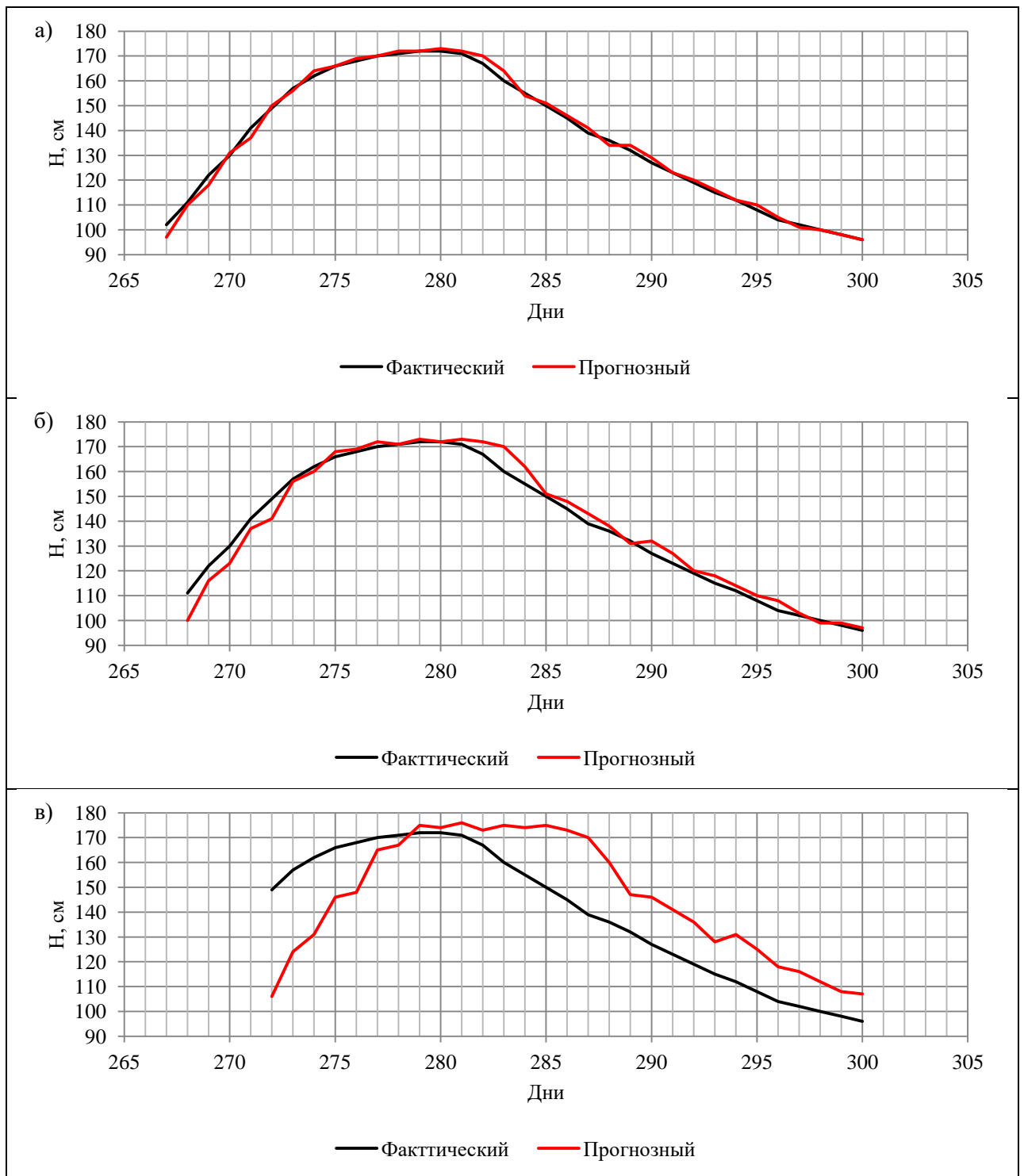


Рисунок 20 – Фактические и прогнозные гидрографы уровней дождевых паводков, река Северная Двина (а – заблаговременность $\tau = 2$, б – заблаговременность $\tau = 3$, в – заблаговременность $\tau = 7$).

На рисунке 19а на пике и спаде половодья отклонения от фактических значений минимальны, наибольшее отклонение наблюдается 22 апреля, фактическое значение составило 622, а прогнозное – 574 см.

При увеличении заблаговременности увеличивается ошибка определения прогнозных значений. Максимальное отклонение также приходится на 22 апреля, как и при заблаговременности, равной 2 дня, только в этом случае прогнозное значение на 100 см меньше фактического.

При заблаговременности семь суток (рисунок 18в) в начале половодья прогнозные значения значительно меньше фактических, а на спаде прогнозные значения уровня воды превышают фактические. Максимальная ошибка определения приходится на 23 – 25 ноября, в эти дни полученные значения отличаются от фактических более чем на 10%.

На рисунке 20а при заблаговременности два дня наблюдаются минимальные ошибки определения уровня воды. В среднем ошибка определения составляет 1%.

Составляя прогноз на три дня вперед, ошибка определения увеличивается. Максимальное отклонение приходится на 24 сентября (268 день), ошибка определения составила 11 см или 10%. В среднем ошибка полученных значений не превышает 3%.

На рисунке 20в прогнозные значения сильно отличаются от фактических. На подъеме полученные значения занижены относительно фактических значений, а при прохождении пика и на спаде паводка – завышены. В среднем ошибка определения прогнозных значений составляет более 10%.

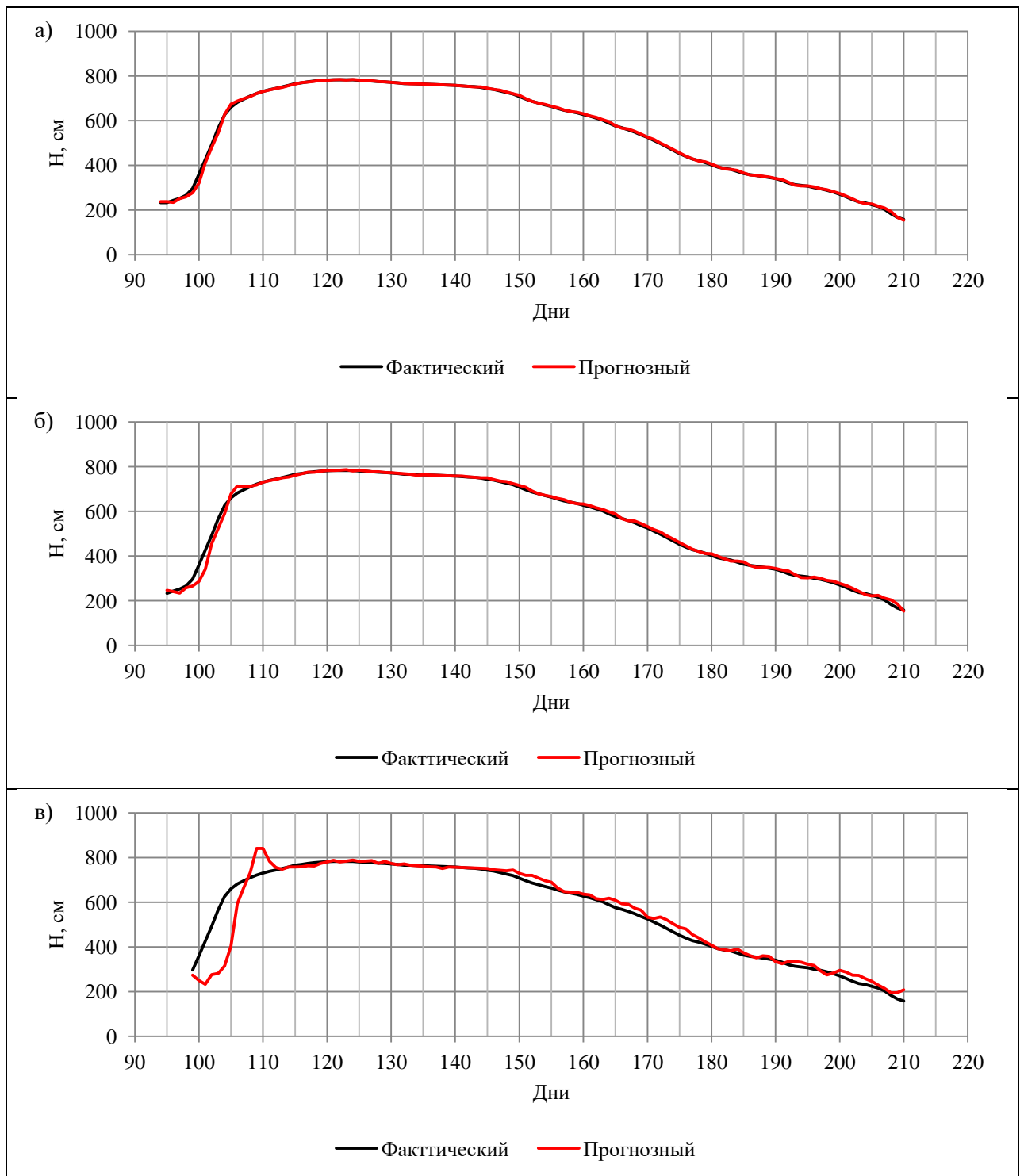


Рисунок 21 – Фактические и прогнозные гидрографы уровней весеннего половодья, река Ишим (а – заблаговременность $\tau = 2$, б – заблаговременность $\tau = 3$, в – заблаговременность $\tau = 7$).

Сопоставляя прогнозные и фактические значения, полученные при заблаговременности два дня, можно сказать, что ошибка определения составляет менее 1%. 10 апреля наблюдается максимальное отклонение прогнозного значения от фактического, ошибка составила 40 см.

При прогнозировании на три дня вперед так же в начале половодья (10 апреля) наблюдается максимальное отклонение, которое составило 74 см. В среднем отклонение прогнозных значений от фактических находится в пределах 2%.

На рисунке 21в в самом начале половодья наблюдаются некоторые отклонения в определении уровней воды, в среднем ошибка определения составляет 35%. Далее значения схожи с фактическими, точность определения находится в пределах 3%.

5 Оценка эффективности прогностической методики

При составлении прогноза нельзя избежать погрешностей, которые могут возникнуть по той или иной причине, например:

- Недостаточность исходных данных;
- Недоучет всех факторов;
- Несовершенство знаний;
- Влияние случайных факторов.

Поэтому перед исполнителем стоит задача – оценить единичный прогноз и оценить прогностическую методику в целом. Для оценки гидрологических прогнозов используются различные критерии, они позволяют оценить сходство между фактическими и прогнозируемыми данными [9].

5.1 Зарубежные подходы

Для того чтобы получить оценку эффективности модели, существует несколько зарубежных подходов. На практике часто используется коэффициентом эффективности Нэша–Сатклиффа, который позволяет нормализовать производительность модели в интерпретируемую шкалу.

Коэффициент эффективности Нэша–Сатклиффа определяется следующим образом:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2} \quad (3)$$

где \bar{Q}_0 – среднее значение фактического ряда;

Q_m^t – прогнозируемое значение;

Q_0^t – фактическое значение в момент времени t .

Рассчитав данный коэффициент, можно определить эффективность модели:

- $NSE = 1$ означает идеальное соответствие между прогнозом и фактическими значениями;
- $NSE = 0$ указывает на то, что модель характеризуется такой же способностью к прогнозированию, как и среднее значение ряда;
- $NSE < 0$ показывает, что вместо прогнозного значения следует использовать среднее по ряду [10].

Расчет коэффициента эффективности представлен в главе 4.3 (таблицы 6 – 9).

5.2 Отечественные подходы

Рассматривая отечественные подходы оценки отдельного прогноза и методики в целом, можно выделить два метода. Первый, метод, разработанный в Государственном гидрологическом институте (ГГИ) в 1940 году, и второй – метод, предложенный Гидрометцентром (ГМЦ) в 1962 году.

Погрешность прогноза представляет собой разность между предсказанной величиной и фактической:

$$\delta = y_{\text{факт}} - y_{\text{пр}} \quad (4)$$

Метод ГГИ

- Оценка отдельного прогноза

Допустимая погрешность по ГГИ представляет собой величину, которая равна 20% от расчетной амплитуды. Расчетная амплитуда – это обеспеченная на 95% сумма положительных и отрицательных величин

изменения прогнозируемого элемента за период заблаговременности прогноза.

$$\delta_{\text{доп}} = \frac{1}{5} A_p \quad (5)$$

Прогноз считается оправдавшимся, если ошибка данного прогноза не будет превышать допустимую погрешность.

- Оценка эффективности методики

Для того, чтобы оценить эффективность методики, необходимо рассчитать обеспеченность прогнозной методики и природной обеспеченности. Методика эффективна в том случае, когда обеспеченность методики будет больше природной обеспеченности.

Обеспеченность методики – это число удовлетворительных прогнозов ($n_{\text{опр}}$), погрешности которых не превышают допустимой погрешности, выраженные в процентах от общего числа выпущенных по данной методике поверочных прогнозов (n):

$$P_M = \frac{n_{\text{опр}}}{n} \cdot 100\% \quad (6)$$

Природная обеспеченность – это суммарная обеспеченность положительных и отрицательных изменений прогнозируемого элемента за период заблаговременности, не превышающих допустимой погрешности.

$$P_{\text{пр}} = \frac{n'_{\text{опр}}}{n'} \cdot 100\% \quad (7)$$

Методика считается эффективной, когда $P_M \geq P_{\text{пр}}$

Метод ГМЦ

- Оценка отдельного прогноза

Оценка оправдываемости отдельного прогноза основывается на методах математической статистики.

Величина допустимой погрешности прогноза определяется в зависимости от наблюдаемой в природных условиях изменчивости предсказываемой величины за период заблаговременности.

Основной статистической мерой изменчивости случайной переменной является ее среднеквадратическое отклонение за период заблаговременности от нормы:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n - 1}} \quad (8)$$

где Δ_i – изменение предсказываемой величины за период заблаговременности;

$\bar{\Delta}$ – норма этих изменений;

n – число членов ряда.

Допустимая погрешность представляет собой долю среднеквадратического отклонения:

$$\delta_{\text{доп}} = \pm 0.674 \sigma_{\Delta} \quad (9)$$

- Оценка эффективности методики

Оценить точность методики можно, рассчитав среднеквадратическую погрешность поверочных прогнозов:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{\text{пр}} - Y_{\text{ф}})^2}{n - m}} \quad (10)$$

где $Y_{\text{пр}}$ – предсказанное значение величины;

$Y_{\text{ф}}$ – фактическое значение величины;

n – число членов ряда;

m – число параметров в прогностическом уравнении (при использовании линейной зависимости $m = 2$).

Оценить качество методики можно при помощи соотношения S/σ_{Δ} .

- При $n \leq 15$ должно быть $S/\sigma_{\Delta} \leq 0.70$;
- При $15 \leq n \leq 25$ должно быть $S/\sigma_{\Delta} \leq 0.75$;
- При $n > 25$ должно быть $S/\sigma_{\Delta} \leq 0.80$ [9].

Оценка эффективности методики по методу ГГИ и ГМЦ представлена в таблицах 2 – 5.

Анализируя данные таблицы 2, можно отметить, что методика прогнозирования расходов весеннего половодья является неэффективной по методу ГГИ на реке Северная Двина при заблаговременности, равной трем суткам. Сопоставляя данный результат с рисунком 13б, можно сказать, что полученные прогнозные значения имеют большую ошибку только на подъеме половодья, на пике и на спаде значения мало различаются между собой. Поэтому можно считать, что методика эффективна.

Прогноз с заблаговременностью 7 суток не дает хороших результатов, несмотря на то, что оценка эффективности методики может давать совершенно другие результаты.

Согласно таблице 3 методика является эффективной и по методу ГГИ, и по методу ГМЦ при прогнозировании с любой заблаговременностью. Как было сказано выше, прогноз на 7 суток вперед составляется с большой

ошибкой. Это связано с тем, что параметры S и σ_{Δ} растут с увеличением заблаговременности, и таким образом, критерий S/σ_{Δ} получается маленьким. По методу ГГИ методика является эффективной, поскольку растет допустимая погрешность, которая в свою очередь зависит от расчетной амплитуды.

Ситуация с прогнозированием уровней воды аналогична прогнозу расходов. Так, согласно таблицам 4 и 5 по методу ГМЦ все методики расчета эффективны, но анализируя графики, соответствующие заблаговременности, равной семи суткам, можно сказать обратно – методика неэффективна.

По методу ГГИ методика прогнозирования оказалась неэффективной на реке Северная Двина при заблаговременности $\tau = 3$ дня. По рисунку 18б видно, что в целом методика эффективна, наибольшие различия наблюдаются в самом начале половодья.

Методика прогнозирования уровней весеннего половодья с заблаговременностью семь суток является неэффективной на реках Чулым и Северная Двина, это доказываются рисунками 16в и 18в.

Несмотря на то, что в таблице 5 методика прогнозирования является эффективной для всех случаев, рисунки 17в и 19в говорят обратное. Рассчитанное значение обеспеченности методики опирается на количество оправдавшихся прогнозов, которые оправдываются за счет большой допустимой погрешности. Таким образом, методика прогнозирования уровней с заблаговременностью семь дней является неэффективной как по методу ГГИ, так и по методу ГМЦ.

На рисунке 21 представлены сравнительные гистограммы по критерию S/σ_{Δ} , а также по обеспеченности методики прогнозирования для расходов и уровней воды.

Таблица 4 – Оценка эффективности методики прогнозирования расходов весеннего половодья по методу ГГИ и ГМЦ

τ	Река	ГГИ				ГМЦ				
		P_M	$P_{Пр}$	Результат		S	$\sigma\Delta$	$S/\sigma\Delta$	Результат	
2	Чулым	98,1	78,3	$P_M > P_{Пр}$	Методика эффективна	34,7	106	0,33	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Сев. Двина	90,7	77,3	$P_M > P_{Пр}$	Методика эффективна	301	520	0,58	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Ишим	100	97,1	$P_M > P_{Пр}$	Методика эффективна	5,53	44,1	0,13	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
3	Чулым	98,1	95,3	$P_M > P_{Пр}$	Методика эффективна	75,2	298	0,25	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Сев. Двина	92,5	93,9	$P_M < P_{Пр}$	Методика неэффективна	731	1449	0,50	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Ишим	100	96,5	$P_M > P_{Пр}$	Методика эффективна	13,3	108	0,12	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
7	Чулым	92	93,2	$P_M < P_{Пр}$	Методика неэффективна	269	649	0,41	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Сев. Двина	83,7	90,2	$P_M < P_{Пр}$	Методика неэффективна	2747	3105	0,88	$S/\sigma\Delta > 0,8$	Методика неэффективна
	Ишим	97,3	93,5	$P_M > P_{Пр}$	Методика эффективна	48,1	212	0,23	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна

Таблица 5 – Оценка эффективности методики прогнозирования расходов дождевых паводков по методу ГГИ и ГМЦ

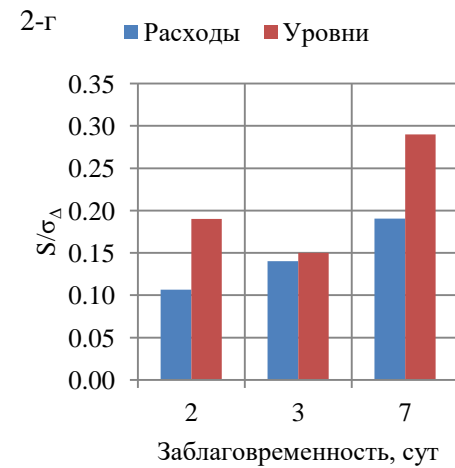
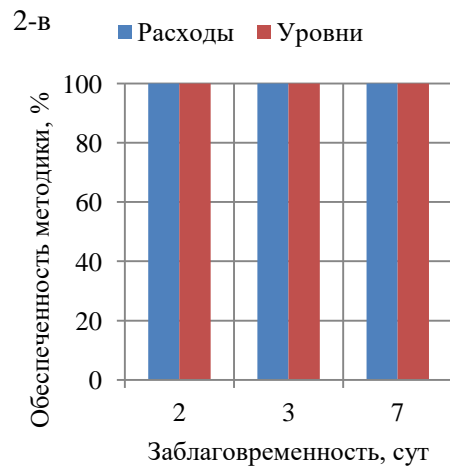
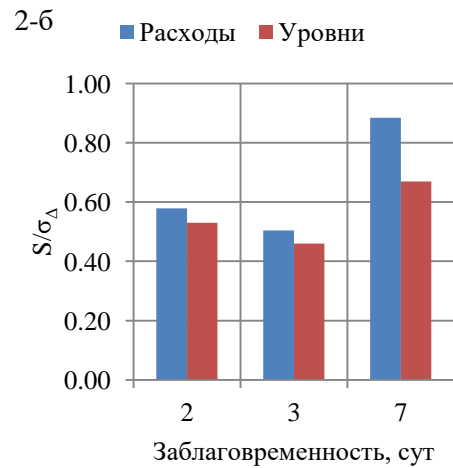
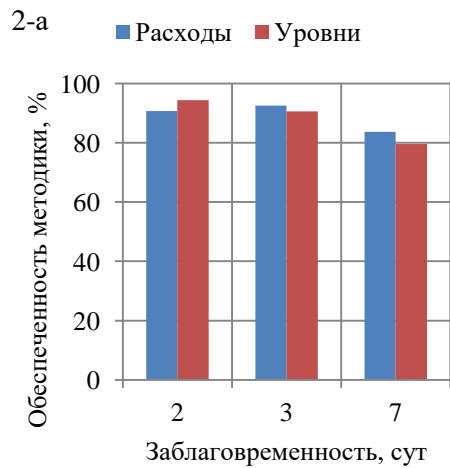
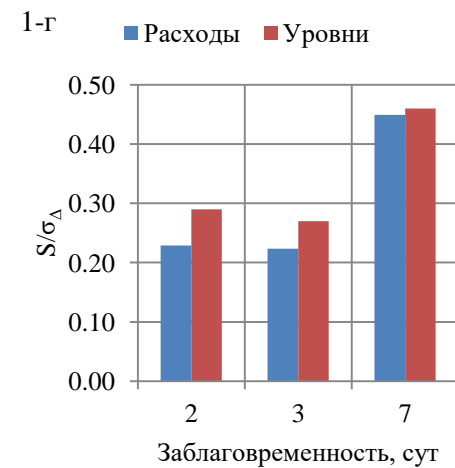
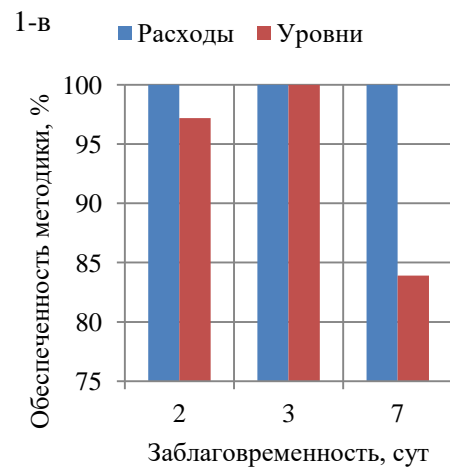
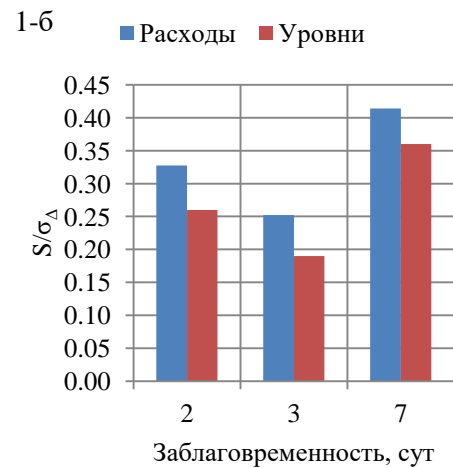
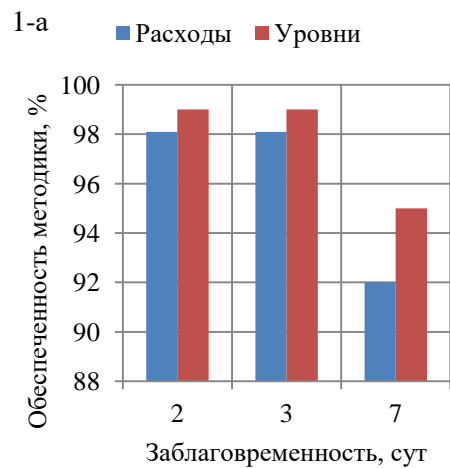
τ	Река	ГГИ				ГМЦ				
		P_M	$P_{Пр}$	Результат		S	$\sigma\Delta$	$S/\sigma\Delta$	Результат	
2	Чулым	100	80,7	$P_M > P_{Пр}$	Методика эффективна	14,3	62,4	0,23	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Сев. Двина	100	65,6	$P_M > P_{Пр}$	Методика эффективна	27,3	256	0,11	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
3	Чулым	100	90,4	$P_M > P_{Пр}$	Методика эффективна	33,2	149	0,22	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Сев. Двина	100	94,4	$P_M > P_{Пр}$	Методика эффективна	49,1	350	0,14	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
7	Чулым	100	75,9	$P_M > P_{Пр}$	Методика эффективна	85,3	190	0,45	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Сев. Двина	100	87,4	$P_M > P_{Пр}$	Методика эффективна	131	689	0,19	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна

Таблица 6 – Оценка эффективности методики прогнозирования уровней весеннего половодья по методу ГГИ и ГМЦ

τ	Река	ГГИ				ГМЦ				
		P_M	$P_{пр}$	Результат	S	$\sigma\Delta$	$S/\sigma\Delta$	Результат		
2	Чулым	99,0	75,5	$P_M > P_{пр}$	Методика эффективна	3,65	14,0	0,26	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Сев. Двина	94,4	74,2	$P_M > P_{пр}$	Методика эффективна	12,0	22,5	0,53	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Ишим	97,4	91,9	$P_M > P_{пр}$	Методика эффективна	5,80	16,2	0,36	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
3	Чулым	99	94,6	$P_M > P_{пр}$	Методика эффективна	7,80	40,1	0,19	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Сев. Двина	90,6	95,7	$P_M < P_{пр}$	Методика неэффективна	29,1	62,8	0,46	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Ишим	98,3	95,5	$P_M > P_{пр}$	Методика эффективна	14,5	46,0	0,32	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
7	Чулым	95	93,8	$P_M > P_{пр}$	Методика эффективна	31,7	87,6	0,36	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Сев. Двина	79,6	90,8	$P_M < P_{пр}$	Методика неэффективна	92,2	137	0,67	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Ишим	92,9	95,4	$P_M < P_{пр}$	Методика неэффективна	61,2	96,9	0,63	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна

Таблица 7 – Оценка эффективности методики прогнозирования уровней дождевых паводков по методу ГГИ и ГМЦ

τ	Река	ГГИ				ГМЦ				
		P_M	$P_{пр}$	Результат	S	$\sigma\Delta$	$S/\sigma\Delta$	Результат		
2	Чулым	97	75,7	$P_M > P_{пр}$	Методика эффективна	3,70	13,0	0,29	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Сев. Двина	100	82,2	$P_M > P_{пр}$	Методика эффективна	2,10	11,0	0,19	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
3	Чулым	100	91	$P_M > P_{пр}$	Методика эффективна	8,30	30,7	0,27	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Сев. Двина	100	93,1	$P_M > P_{пр}$	Методика эффективна	4,40	30,0	0,15	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
7	Чулым	83,9	81,9	$P_M > P_{пр}$	Методика эффективна	20,9	45,3	0,46	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Сев. Двина	100	87,2	$P_M > P_{пр}$	Методика эффективна	16,4	56,3	0,29	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна



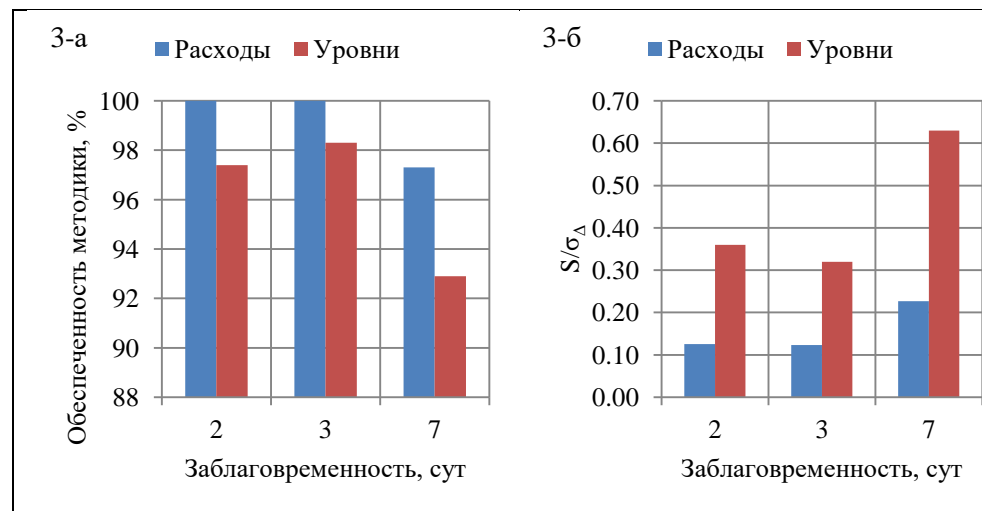


Рисунок 22. Сравнительные гистограммы по критериям для уровней и расходов воды.
 1-а, 1-б – река Чулым, весеннее половодье; 1-в, 1-г – река Чулым, дождевые паводки;
 2-а, 2-б – река Северная Двина, весеннее половодье; 2-в, 2-г – река Северная Двина, дождевые паводки;
 3-а, 3-б – река Ишим, весеннее половодье.

5.3 Сравнение результатов

Сравнение отечественной и зарубежной методик эффективности, метод ГМЦ и метод Нэша–Сатклиффа соответственно, представлен в таблицах 6 – 9.

Согласно данным таблиц 6 – 9, коэффициент эффективности Нэша–Сатклиффа во всех случаях близок к 1, что означает идеальное соответствие между прогнозными и фактическими значениями. Наибольшие отклонения от 1 наблюдаются при заблаговременности, равной семи суткам.

При прогнозировании расходов весеннего половодья с заблаговременностью семь суток, методика считается неэффективной по методу ГМЦ, коэффициент Нэша–Сатклиффа при этом равен 0,93.

Таблица 8 – Сравнение отечественной и зарубежной методик эффективности прогнозирования расходов весеннего половодья

τ	Река	Нэш–Сатклифф				ГМЦ				
		<i>S</i>	σ	<i>NSE</i>	Результат	<i>S</i>	$\sigma\Delta$	<i>S</i> / $\sigma\Delta$	Результат	
2	Чулым	34,7	1175	1,000	Методика эффективна	34,7	106	0,33	<i>S</i> / $\sigma\Delta$ < 0,8	Методика эффективна
	Сев. Двина	301	3937	0,999	Методика эффективна	301	520	0,58	<i>S</i> / $\sigma\Delta$ < 0,8	Методика эффективна
	Ишим	5,53	277	1,000	Методика эффективна	5,53	44,1	0,13	<i>S</i> / $\sigma\Delta$ < 0,8	Методика эффективна
3	Чулым	75,2	1175	0,999	Методика эффективна	75,2	298	0,25	<i>S</i> / $\sigma\Delta$ < 0,8	Методика эффективна
	Сев. Двина	731	3937	0,995	Методика эффективна	731	1449	0,50	<i>S</i> / $\sigma\Delta$ < 0,8	Методика эффективна
	Ишим	13,3	277	1,000	Методика эффективна	13,3	108	0,12	<i>S</i> / $\sigma\Delta$ < 0,8	Методика эффективна
7	Чулым	269	1175	0,989	Методика эффективна	269	649	0,41	<i>S</i> / $\sigma\Delta$ < 0,8	Методика эффективна
	Сев. Двина	2747	3937	0,934	Методика эффективна	2747	3105	0,88	<i>S</i> / $\sigma\Delta$ > 0,8	Методика неэффективна
	Ишим	48,1	277	0,994	Методика эффективна	48,1	212	0,23	<i>S</i> / $\sigma\Delta$ < 0,8	Методика эффективна

Таблица 9 – Сравнение отечественной и зарубежной методик эффективности прогнозирования расходов дождевых паводков

τ	Река	Нэш–Сатклифф				ГМЦ				
		<i>S</i>	σ	<i>NSE</i>	Результат	<i>S</i>	$\sigma\Delta$	<i>S</i> / $\sigma\Delta$	Результат	
2	Чулым	14,3	209	0,999	Методика эффективна	14,3	62,4	0,23	<i>S</i> / $\sigma\Delta$ < 0,8	Методика эффективна
	Сев. Двина	27,3	839	1,000	Методика эффективна	27,3	256	0,11	<i>S</i> / $\sigma\Delta$ < 0,8	Методика эффективна
3	Чулым	33,2	209	0,997	Методика эффективна	33,2	149	0,22	<i>S</i> / $\sigma\Delta$ < 0,8	Методика эффективна
	Сев. Двина	49,1	839	1,000	Методика эффективна	49,1	350	0,14	<i>S</i> / $\sigma\Delta$ < 0,8	Методика эффективна
7	Чулым	85,3	209	0,988	Методика эффективна	85,3	190	0,45	<i>S</i> / $\sigma\Delta$ < 0,8	Методика эффективна
	Сев. Двина	131	839	0,997	Методика эффективна	131	689	0,19	<i>S</i> / $\sigma\Delta$ < 0,8	Методика эффективна

Таблица 10 – Сравнение отечественной и зарубежной методик эффективности прогнозирования уровней весеннего половодья

τ	Река	Нэш–Сатклифф				ГМЦ				
		<i>S</i>	σ	<i>NSE</i>	Результат	<i>S</i>	σΔ	<i>S</i> /σΔ	Результат	
2	Чулым	3,65	173	1,000	Методика эффективна	3,65	14,0	0,26	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Сев. Двина	12,0	198	0,999	Методика эффективна	12,0	22,5	0,53	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Ишим	5,82	226	1,000	Методика эффективна	5,80	16,2	0,36	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
3	Чулым	7,76	173	1,000	Методика эффективна	7,80	40,1	0,19	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Сев. Двина	29,1	198	0,997	Методика эффективна	29,1	62,8	0,46	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Ишим	14,5	226	0,999	Методика эффективна	14,5	46,0	0,32	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
7	Чулым	31,7	173	0,993	Методика эффективна	31,7	87,6	0,36	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Сев. Двина	92,2	198	0,972	Методика эффективна	92,2	137	0,67	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Ишим	61,2	226	0,989	Методика эффективна	61,2	96,9	0,63	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна

Таблица 11 – Сравнение отечественной и зарубежной методик эффективности прогнозирования уровней дождевых паводков

τ	Река	Нэш–Сатклифф				ГМЦ				
		<i>S</i>	σ	<i>NSE</i>	Результат	<i>S</i>	σΔ	<i>S</i> /σΔ	Результат	
2	Чулым	3,75	43,6	0,998	Методика эффективна	3,75	13,0	0,29	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Сев. Двина	2,10	74,2	1,000	Методика эффективна	2,10	11,0	0,19	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
3	Чулым	8,30	43,6	0,989	Методика эффективна	8,30	30,7	0,27	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Сев. Двина	4,40	74,2	0,999	Методика эффективна	4,40	30,0	0,15	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
7	Чулым	20,9	43,6	0,939	Методика эффективна	20,9	45,3	0,46	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна
	Сев. Двина	16,4	74,2	0,991	Методика эффективна	16,4	56,3	0,29	$S/\sigma\Delta < 0,8$	Методика эффективна

Заключение

В настоящей работе был произведен прогноз расходов и уровней воды на крупных реках с площадью водосбора более 100000 км². В качестве объектов исследования выступали следующие реки: Чулым, Северная Двина и Ишим.

По данным о расходах и уровнях воды на соответствующих гидрологических постах были построены гидрографы, на которых были выделены весеннее половодье и дождевые паводки.

Для составления прогностических зависимостей были использованы пять лет наблюдений, прогноз давался на шестой год с заблаговременностью, равной двум, трем и семи суткам.

Методика прогноза была оценена с помощью разных критериев. Из отечественных – метод ГГИ и ГМЦ, а из зарубежных – коэффициент эффективности Нэша–Сатклиффа.

Из всех прогнозов методика является неэффективной по методу ГМЦ для прогноза расходов весеннего половодья с заблаговременностью семь суток на реке Северная Двина, по методу ГГИ – методика неэффективна при прогнозировании расходов и уровней половодья с заблаговременностью 3 и 7 суток на реке Северная Двина, на реке Чулым – при прогнозе расходов половодья с заблаговременностью 3 суток, на реке Ишим – при прогнозировании уровней весеннего половодья с заблаговременностью семь дней.

Коэффициент эффективности Нэша–Сатклиффа во всех случаях близок к 1, что говорит об идеальном соответствии между прогнозными и фактическими значениями.

Анализируя совмещенные гидрографы фактических и прогнозных значений расходов и уровней воды с заблаговременностью 7 суток, можно сказать, что методика в целом является неэффективной, так как прогнозные значения сильно отличаются от фактических.

Список использованных источников

1. *oGeo* [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: <https://ogeo.info/> (Дата обращения: 17.02.2023)
2. *Vizit.com* [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: <https://vuzlit.com/> (Дата обращения: 17.02.2023)
3. Образовательный портал [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: <https://obrazovanie-gid.ru/> (Дата обращения: 17.02.2023)
4. Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы [Текст] / Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2007. – 436 с.
5. Лобанов, С.А., Холоден Е.Э. Задания и методические указания для выполнения практических работ по учебной дисциплине "Прогноз гидрологических полей" [Текст] / Лобанов, С.А., Холоден Е.Э. – Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2019. – 32 с.
6. Шаночкин С. В., Викторова Н. В., Гайдукова Е. В. Практические задания по дисциплине «Гидрологические прогнозы» [Текст] / Шаночкин С. В., Викторова Н. В., Гайдукова Е. В. – СПб.: Астерион, 2017. – 32 с.
7. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (Дата обращения: 14.10.2022)
8. Руководство по гидрологическим прогнозам. Выпуск 2 "Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках" – Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. – 248 с.

9. Гайдукова Е.В., Викторова Н.В. Гидрологические прогнозы. Конспект лекций [Текст] / Гайдукова Е.В., Викторова Н.В. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2021. – 92 с.
10. Knoben, W. J. M., Freer, J. E., and Woods, R. A.: *Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores*, Hydrol. Earth Syst. Sci., 23, 4323–4331