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 **Математическое моделирование прохождения волн половодья и паводков на реке Урал**

Исполнитель Шестаев Тимофей Александрович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель Кандидат технических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой инженерной гидрологии.
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«1» июня 2026 г.

Санкт–Петербург
2026

ВВЕДЕНИЕ ..... **Ошибка! Закладка не определена.**
1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ.. 7
1.1 Климатические характеристики. 7
1.2 Гидрологический режим р. Урал. 9
1.3 Уровенный режим водохранилищ на р. Урал. 12
1.4 Исходные данные для расчетов и прогнозов волн половодий и паводков. 14
1.5 Катастрофическая ситуация на ириклинском водохранилище. ...1**Ошибка! Закладка не определена.**
2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ. 22
2.1 Математическая модель руслового стока. 22
2.2. Критерии оценки прогноза ..... **Ошибка! Закладка не определена.**
2.3 Поиск решения 33
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ВОЛН ПОЛОВОДЬЯ И ПАВОДКОВ НА Р. УРАЛ. 35
3.1 Выбор расчетных участков 35
3.2 Параметризация модели руслового стока 39
3.3 Оценка расчёта на независимом материале 40
5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ 42
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 44
ПРИЛОЖЕНИЯ 45

Введение

Актуальность темы. Гидрологические прогнозы играют ключевую роль в обеспечении безопасности населения и устойчивого функционирования экономики в условиях изменчивости водного режима рек. Российская Федерация обладает разветвленной речной сетью, и многие регионы страны ежегодно сталкиваются с угрозой наводнений, наносящих значительный материальный ущерб и создающих опасность для жизни людей . По данным Всероссийского научно-исследовательского института по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций (ВНИИ ГОЧС), опасные уровни воды регулярно фиксируются в десяти и более регионах России, что может нарушать судоходство и работу водозаборных сооружений .

Особую актуальность проблема прогнозирования паводков приобретает в бассейне реки Урал. Катастрофическое наводнение весной 2024 года в Оренбургской области, вызванное обильным снеготаянием и повышением уровня воды, привело к прорыву дамбы в Орске. Эта трагедия наглядно продемонстрировала уязвимость существующей системы гидрологической защиты и настоятельную потребность в совершенствовании методов прогнозирования паводков на реке Урал.

В этих условиях традиционные методы гидрологического прогнозирования, основанные на эмпирических зависимостях и статистических связях, демонстрируют недостаточную эффективность. Они не позволяют в полной мере учесть сложное пространственно-временное распределение стокообразующих факторов, неоднородность подстилающей поверхности и гидравлические особенности движения паводочных волн на больших реках.

Цель выпускной квалификационной работы заключается в разработке математической модели для прогнозирования паводков на реке Урал, позволяющей на основе гидрометеорологических данных (осадки, температура воздуха, снегозапасы, уровни и расходы воды) рассчитывать гидрограф стока с приемлемой для практики точностью и заблаговременностью.

Задачи исследования:

1. Провести анализ гидрологических и гидрографических характеристик бассейна реки Урал, определяющих условия формирования паводков.
2. Изучить существующие методы математического моделирования паводков, включая модели с сосредоточенными и распределенными параметрами, и обосновать выбор наиболее подходящей структуры модели для условий р. Урал.
3. Разработать концептуальную математическую модель формирования талого и дождевого стока для бассейна р. Урал, учитывающую основные стокообразующие процессы: снеготаяние, потери на инфильтрацию и испарение, поверхностное задержание, склоновое и русловое добегание.
4. Реализовать численную схему модели и провести ее параметризацию с использованием данных многолетних гидрометеорологических наблюдений.
5. Выполнить верификацию модели путем сопоставления расчетных гидрографов с фактическими данными о расходах воды в замыкающих створах (гидропосты «Орск», «Оренбург», «Уральск») за ряд лет.
6. Оценить эффективность разработанной модели по критериям, принятым в гидрологическом прогнозировании (средняя квадратическая погрешность, соотношение S/σ, оправдываемость прогнозов).

Объект исследования — гидрологические процессы формирования паводков в бассейне реки Урал.

Предмет исследования — математические модели и численные методы прогнозирования расходов и уровней воды при прохождении весеннего половодья и дождевых паводков на р. Урал.

Река Урал представляет собой одну из крупнейших трансграничных рек Евразии, протекающую по территории Российской Федерации и Республики Казахстан. Она имеет важное социально-экономическое значение, обеспечивая водными ресурсами населённые пункты, сельскохозяйственные угодья, промышленные предприятия, а также поддерживая функционирование природных экосистем.

В современных условиях усиливающегося антропогенного воздействия и глобальных климатических изменений наблюдаются существенные трансформации гидрологического режима рек. В частности, фиксируется изменение сроков наступления половодий, увеличение частоты экстремальных паводков, а также рост их разрушительного потенциала. Для бассейна реки Урал данные процессы имеют особую актуальность, поскольку регион характеризуется значительной изменчивостью климатических параметров и высокой уязвимостью к гидрологическим рискам.

Актуальность темы выпускной квалификационной работы обусловлена необходимостью разработки научно обоснованных методов прогнозирования прохождения волн половодья и паводков. Такие методы позволяют:

- своевременно предупреждать население о возможных наводнениях;
- минимизировать материальный ущерб;
- повышать эффективность управления водохранилищами;
- обеспечивать устойчивое водопользование.

Математическое моделирование гидрологических процессов является ключевым инструментом в решении указанных задач. Оно позволяет формализовать сложные природные процессы, учитывать влияние множества факторов (климатических, геоморфологических, гидротехнических) и проводить расчёты различных сценариев развития паводковой ситуации.

Цель работы заключается в разработке и применении математической модели, описывающей процесс формирования и прохождения волн половодья и паводков на реке Урал.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести детальный анализ физико-географических условий бассейна реки Урал.
2. Исследовать климатические факторы, влияющие на формирование стока.
3. Проанализировать гидрологический режим реки, включая сезонную динамику уровней и расходов воды.
4. Изучить особенности функционирования водохранилищ и их влияние на гидрологический режим.
5. Выбрать адекватную математическую модель (например, уравнения неустановившегося течения).
6. Выполнить численное моделирование паводковых процессов.
7. Провести оценку точности модели и её практической применимости.

Глава 1. Физико-географическое описание района исследований

1.1. Климатические характеристики

Бассейн реки Урал расположен в пределах умеренного климатического пояса и характеризуется ярко выраженной континентальностью климата. Это проявляется в значительных амплитудах температур, неравномерности распределения осадков и высокой изменчивости погодных условий.

Среднегодовая температура воздуха изменяется в пределах от −3…−5 °C в северной части бассейна до +3…+5 °C в южной. Январь является самым холодным месяцем: средние температуры составляют −15…−20 °C, а в отдельные периоды могут опускаться ниже −30 °C. Июль — самый тёплый месяц, со средними температурами +20…+25 °C, иногда достигающими +35 °C.

Такая значительная сезонная контрастность температур обусловливает формирование устойчивого снежного покрова в зимний период, который является основным источником весеннего половодья.

Осадки

Годовое количество атмосферных осадков распределяется неравномерно по территории бассейна:

- северные и горные районы — до 500–600 мм/год;
- центральные районы — около 350–450 мм/год;
- южные степные области — 250–300 мм/год.

Основная доля осадков (до 70%) приходится на тёплый период года (май–сентябрь), часто в виде ливневых дождей, способных вызывать кратковременные, но интенсивные паводки.

Зимой осадки выпадают преимущественно в виде снега. Высота снежного покрова может достигать 30–60 см, а в отдельных районах — более 70 см. Запасы воды в снежном покрове являются определяющим фактором величины весеннего стока.

Испарение играет существенную роль в формировании водного баланса. Потенциальная испаряемость в летний период значительно превышает количество осадков, особенно в южной части бассейна. Это приводит к дефициту влаги и снижению водности реки в меженный период.

Величина испарения зависит от:

- температуры воздуха;
- скорости ветра;
- влажности;
- характеристик подстилающей поверхности.

Таким образом, климатические условия бассейна формируют специфический режим питания реки, при котором доминирует снеговое питание с существенным вкладом дождевых вод.

1.2. Гидрологический режим р. Урал

Гидрологический режим реки Урал определяется сочетанием климатических факторов, геоморфологических особенностей бассейна и антропогенного воздействия.

Тип питания реки

Река Урал относится к рекам со смешанным типом питания:

- снеговое (основное) — до 60–70%;
- дождевое — 20–30%;
- подземное — 5–10%.

Преобладание снегового питания обусловливает наличие ярко выраженного весеннего половодья.

Весеннее половодье

Половодье является основной фазой гидрологического режима. Оно формируется в результате интенсивного таяния снежного покрова и характеризуется:

- резким увеличением расходов воды;
- быстрым подъёмом уровня;
- значительной продолжительностью (от 2 до 6 недель).

Формирование паводковой волны зависит от:

- температуры воздуха;
- скорости снеготаяния;

- насыщенности почвы влагой;
- наличия ледовых заторов.

В отдельные годы половодье может сопровождаться катастрофическими наводнениями.

Дождевые паводки

Летне-осенние паводки формируются в результате выпадения интенсивных осадков. Они характеризуются:

- быстрым формированием;
- относительно небольшой продолжительностью;
- локальным характером.

Несмотря на меньший объём по сравнению с половодьем, такие паводки могут представлять серьёзную опасность для населённых пунктов.

Межень

Меженный период наблюдается летом и зимой:

- летняя межень связана с высокой испаряемостью;
- зимняя — с ледоставом и минимальным притоком воды.

В этот период уровни воды минимальны, что влияет на водоснабжение и экосистемы.

Ледовый режим

Зимой на реке устанавливается ледостав, продолжающийся от 4 до 5 месяцев. Весеннее вскрытие сопровождается ледоходом, который может вызывать заторы и резкие подъёмы уровней воды.

Пространственная неоднородность режима

В верховьях реки гидрологический режим отличается большей динамичностью, тогда как в нижнем течении он более сглажен за счёт уменьшения уклонов и влияния водохранилищ.

1.3. Уровенный режим водохранилищ на р. Урал.

Регулирование стока на реке Урал осуществляется с помощью системы водохранилищ, среди которых ключевую роль играет Ириклинское водохранилище.

Основные функции водохранилищ

Водохранилища выполняют следующие функции:

- регулирование паводкового стока;
- обеспечение водоснабжения;
- выработка электроэнергии;
- поддержание экологического стока.

Сезонная динамика уровней

Уровенный режим водохранилищ характеризуется выраженной сезонностью:

- весной происходит интенсивное наполнение.
- летом и осенью — постепенный сброс воды.
- зимой уровень относительно стабилен.

Амплитуда колебаний уровней может достигать нескольких метров.

Влияние на паводковые процессы

Водохранилища существенно трансформируют естественный гидрологический режим:

- снижают пики половодья.
- увеличивают продолжительность паводковых волн;

- уменьшают скорость распространения волн.

Это необходимо учитывать при математическом моделировании, так как наличие регулирующих сооружений изменяет параметры гидродинамических процессов.

Управление режимом

Эксплуатация водохранилищ осуществляется на основе:

- гидрологических прогнозов;
- текущих уровней воды;
- потребностей водопользователей.

Ошибки в управлении могут привести либо к затоплениям, либо к дефициту воды, что подчёркивает важность точного моделирования и прогнозирования.

В целом физико-географические условия бассейна реки Урал формируют сложную и многокомпонентную систему гидрологических процессов, требующую применения современных методов математического моделирования для их адекватного описания и прогнозирования.

1.4 Исходные данные

В данной выпускной квалификационной работе исходными данными послужили уровни воды на Ириклинском хранилище 2020-2023.

Число	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	819 I	798 I	788 I	834 Р	1070	1121	1088	1063	1042	1025	1013	1001 I
2	819 I	792 I	787 I	848 Р	1072	1119	1088	1064	1042	1025	1012	1001 I
3	818 I	795 I	787 I	861 Р	1075	1117	1087	1062	1041	1025	1012	1001 I
4	818 I	795 I	787 I	872 Р	1078	1117	1086	1062	1041	1024	1012	1000 I
5	818 I	795 I	787 I	885 Р	1081	1117	1085	1060	1041	1024	1011	999 I
6	817 I	795 I	786 I	902 Р	1084	1116	1084	1058	1042	1028	1011	999 I
7	817 I	794 I	786 I	919 Ч	1086	1115	1084	1056	1041	1023	1011	998 I
8	817 I	794 I	785 I	935 Ч	1089	1114	1084	1054	1039	1022	1011	998 I
9	816 I	794 I	785 I	946 Ч	1093	1113	1083	1054	1039	1022	1011	998 I
10	815 I	794 I	784 I	956 Ч	1097	1112	1082	1053	1040	1021	1011	997 I
11	815 I	794 I	784 I	967 Ч	1099	1112	1081	1051	1041	1020	1011	997 I
12	814 I	793 I	783 I	979 Ч	1102	1112	1079	1050	1042	1020	1010	997 I
13	814 I	793 I	782 I	989 Ч	1103	1109	1079	1049	1042	1020	1010	996 I
14	813 I	793 I	781 I	997 Ч	1105	1107	1079	1048	1040	1019	1009	996 I
15	813 I	793 I	780 I	1006 Ч	1107	1107	1078	1048	1039	1019	1009)	995 I
16	812 I	793 I	780 I	1014	1108	1106	1076	1047	1037	1019	1009)	995 I
17	812 I	792 I	781 I	1021	1109	1105	1074	1046	1035	1019	1007 Z	995 I
18	812 I	792 I	781 I	1024	1111	1104	1073	1045	1034	1019	1007 Z	995 I
19	811 I	792 I	782 I	1028	1114	1104	1072	1044	1033	1018	1005 Z	994 I

20	810 I	792 I	783 I	1034	1115	1103	1071	1043	1032	1017	1005 I	994 I
21	810 I	791 I	784 I	1039	1116	1100	1069	1043	1032	1017	1004 I	992 I
22	808 I	791 I	784 I	1042	1117	1098	1069	1042	1032	1016	1004 I	992 I
23	807 I	791 I	787 I	1046	1118	1097	1071	1042	1031	1016	1004 I	991 I
24	806 I	791 I	791 I	1049	1119	1097	1072	1042	1028	1016	1003 I	991 I
25	804 I	791 I	794 I	1054	1120	1096	1072	1042	1028	1015	1003 I	990 I
26	803 I	790 I	796 (	1055	1120	1094	1071	1042	1027	1016	1003 I	989 I
27	802 I	789 I	799 (	1057	1120	1093	1069	1042	1026	1016	1002 I	989 I
28	800 I	789 I	802 (	1061	1121	1093	1067	1042	1026	1015	1002 I	989 I
29	799 I	788 I	805 (	1064	1121	1091	1064	1043	1026	1014	1002 I	988 I
30	798 I	-	813 (	1067	1120	1089	1063	1043	1025	1013	1002 I	987 I
31	798 I	-	823 (	-	1119	-	1063	1043	-	1013	-	987 I

Таблица. 1.1 Уровни воды на Ириклинском водохранилище 2020 год

А также уровни воды на реке Урал по постам:

- р. Урал - с. Уральск
- р. Урал - г. Орск
- р. Урал - с. Донское
- р. Урал - г. Оренбург
- р. Урал - с. Илек

Число	Месяц											
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	32 _I	43 _I	50 _I	80 _(~	146	50 ^	28	55	44 ^	22	20	25 _I
2	32 _I	43 _I	51 _I	97 (~	147	48	28	55	42	22	20	25 _I
3	32 _I	43 _I	54 I	108 (~	149	46	27	52	38	21	19	25 _I
4	32 _I	43 _I	54 I	118 (	153 ^	43	27	52	36	21	19	25 _I
5	33 _I	43 _I	56 I	128)(	150	42	28	55	36	21	18	26 _I
6	33 I	44 I	57 I	140)	144	42	32	56	34	20	18	26 I
7	33 I	44 I	57 I	158 ^)	140	40	32	49	32	20	18 _	26 I
8	34 I	44 I	58 I	148 Г	138	40	31	44 _	32	22	19	26 I
9	35 I	45 I	58 I	138	129	39	30	46 _	30	22	19	27 I

10	35 I	45 I	58 ~	130	103	37	28	50	29	21	19	27 I
11	35 I	45 I	60 ~	118	88	35	27	75	29	19	19	27 I
12	35 I	45 I	60 ~	103	97	35	30	99	28	19	18	27 I
13	36 I	45 I	60 ~	90	90	34	30	199 ^	28	18	19)	27 I
14	36 I	45 I	61 ~	94	87	34	28	184	27	18	20)	27 I
15	37 I	45 I	61 ~	96	82	32	28	148	29	18	21 Z	27 I
16	37 I	46 I	61 ~	95	76	30	27	122	29	17 _	21 I	28 I
17	38 I	46 I	63 ~	93	72	30	25	120	27	17 _	22 I	28 I
18	38 I	46 I	64 ~	96	69	30	23	129	26	18	22 I	28 I
19	39 I	46 I	65 ~	97	65	29	22 _	144	26	18	23 I	28 I
20	39 I	46 I	65 ~	97	65	28	22 _	137	24	18	23 I	28 I
21	39 I	46 I	66 ~	108	61	28	25	116	25	19	23 I	28 I
22	40 I	47 I	66 ~	110	57	27	27	99	26	19	23 I	29 I
23	41 I	47 I	64 ~	113	56	27	35	91	26	19	23 I	29 I
24	41 I	47 I	64 ~	122	52	27	39	82	27	21	23 I	29 I
25	42 I	47 I	65 ~	134	54	27 _	40	74	27	22	23 I	30 ^I
26	43 ^I	48 ^I	65 ~	152	54	28	46	68	26	23 ^	24 I	30 ^I
27	43 ^I	48 ^I	66 ~	158	54	28	51	61	26	23 ^	24 I	30 ^I
28	43 ^I	48 ^I	69 ~	155	56	29	55 ^	58	25	22	24 I	30 ^I
29	43 ^I	48 ^I	70 ~	139	53	29	55 ^	54	25	22	25 ^I	30 ^I
30	43 ^I	0	71 ~	133	53	28	53	51	23 _	21	25 ^I	30 ^I
31	43 ^I	0	73 ^~	0	50 _	0	53	47	0	21	0	30 ^I

Таблица. 1.2 Уровни воды р. Урал - г. Уральск

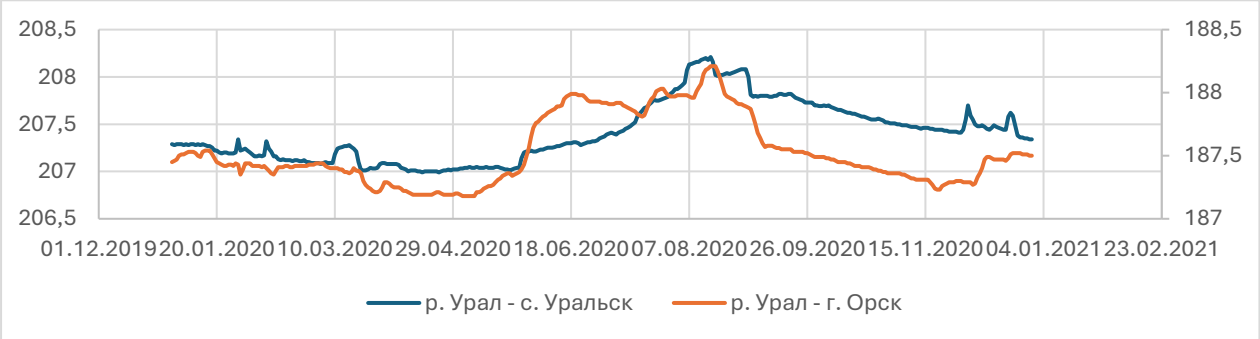


Рис 1.1 Сравнение уровней воды на постах с. Уральск и г. Орск за 2020 год.

1.5 Катастрофическая ситуация на ириклинском водохранилище

Наводнение началось в первых числах апреля и быстро достигло катастрофических масштабов из-за прорыва защитных сооружений.

5 апреля 2024 года в Орске прорвало защитную дамбу, что послужило началом масштабного затопления. Пик уровня воды в реке Урал у Оренбурга был зафиксирован 14 апреля, когда вода поднялась до отметки 1187 см, что почти на 2,5 метра выше критического уровня. По некоторым данным, максимальный уровень достигал 12 метров.

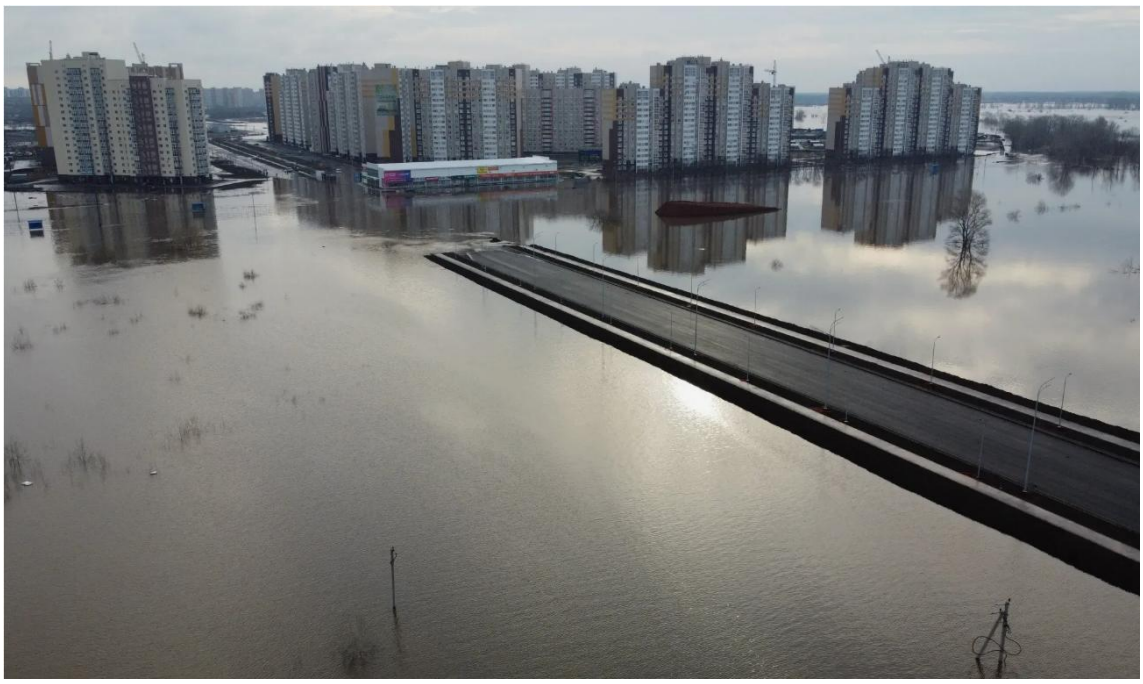


Рис. 1.2 Разлив реки Урал у Оренбурга 2024 год

Сильнее всего пострадала Оренбургская область (города Орск и Оренбург), однако наводнение также затронуло Курганскую, Тюменскую области и ряд регионов Западного Казахстана.

Расследование, завершённое Западно-Уральским управлением Ростехнадзора, показало, что катастрофа стала возможной из-за сочетания природных факторов и человеческих ошибок.

- Просчёты в проектировании и строительстве: Были выявлены ошибки в проекте дамбы, в том числе неверный расчёт максимального расхода воды в реке Урал. В ходе строительства также допускались отступления от проектной документации.
- Неподготовленность водохранилища: Ириклинское водохранилище, которое должно выполнять роль буфера для паводковых вод, не было заблаговременно подготовлено к приёму большого объёма воды. Свободная ёмкость перед паводком была значительно ниже, чем годом ранее.
- Природные факторы: К ним относят аномально влажную осень, глубокое промерзание почвы, рекордные запасы снега и быстрое потепление в начале апреля 2024 года.

Масштаб последствий оказался колоссальным. Ниже приведены сводные данные из разных источников (некоторые цифры могут отличаться в зависимости от периода и методики подсчёта):

Показатель	Данные
Затопленные жилые дома	от 11,6 тыс. до 32,6 тыс.

Показатель	Данные
Затопленные приусадебные участки	от 18,5 тыс. до 52,4 тыс.
Эвакуировано людей	17,8 тыс. человек
Погибшие	15 человек
Пострадавшие	311,5 тыс. человек
Оставшиеся без жилья	4,5 тыс. человек

Таблица 1.3 Статистические данные по ущербу за 2024 год

Инфраструктуре также был нанесён значительный урон: пострадало 60 социальных объектов, было разрушено 6 детских лагерей и затоплено 46 низководных мостов. По спутниковым данным, в одном только Оренбурге и его окрестностях в зоне затопления оказалось более 7 тысяч строений.

Экономический ущерб также огромен:

- Только в Оренбургской области он оценивается в сумму, превышающую 40 млрд рублей.
- На восстановление дорог в 2026 году правительством РФ выделено дополнительно 850 млн рублей.



Рис. 1.3 затопленная часть г. Орска спутниковый снимок 2024 год

По итогам расследования Ростехнадзора основная вина была возложена на человеческий фактор, а не на непреодолимую силу стихии. Городское Управление ЖКХ Орска привлечено к административной ответственности, а материалы расследования направлены в прокуратуру для дальнейших решений, включая возможное возбуждение уголовных дел.

Эта трагедия обнажила системные проблемы в проектировании, эксплуатации гидротехнических сооружений и прогнозировании чрезвычайных ситуаций.

После спада воды остро встал вопрос о том, кто понесет ответственность за масштабные разрушения. Ход расследования и судебных процессов оказался непростым.

Восемь жителей Орска, потерявших имущество, подали иск в суд на администрацию города и компанию «Интер РАО — Электрогенерация», управляющую Ириклинской ГРЭС. Они настаивали, что трагедия вызвана не только природой, но и действиями людей. Суд частично удовлетворил их требования, постановив взыскать в пользу истцов 11 миллионов рублей.

Несмотря на выводы Ростехнадзора о нарушениях, по прошествии двух лет после паводка ни один чиновник не был привлечен к уголовной ответственности. По фактам халатности и нарушений при строительстве было возбуждено 9 уголовных дел, однако обвинения никому не предъявлены, расследование продолжается.

Были выявлены и факты мошенничества при ликвидации последствий. В суд направлено дело против руководителя компании «Вектор», которого обвиняют в хищении 8 млн рублей, выделенных на очистку русла реки Урал в Орске.

В зоне бедствия фиксировались и другие преступления. Например, в июле 2024 года суд начал рассматривать дело военнослужащего, обвиняемого в мародерстве — краже имущества из покинутых жителями домов.

Получение компенсаций и нового жилья стало отдельным испытанием для пострадавших, выявив бюрократические сложности.

Часть людей, лишившихся единственного жилья, столкнулась с отказами в помощи. Например, если дом находился на территории садового товарищества и не был оформлен должным образом, или если у кого-то из членов семьи была доля в другой недвижимости, комиссии отказывали в предоставлении нового жилья. Люди были вынуждены ночевать у родственников или жить в полуразрушенных, пораженных плесенью домах.

Аналогичные проблемы с получением помощи возникли и у жителей Западно-Казахстанской области, также сильно пострадавшей от разлива Урала. Люди, годами жившие в домах на территории садовых обществ, не смогли получить новые квартиры из-за бюрократических проволочек.

Трагедия 2024 года заставила пересмотреть подходы к управлению водными ресурсами. Основное внимание было приковано к Ириклинскому

водохранилищу, от режима работы которого напрямую зависит уровень воды в Урале.

Глава 2. Математический аппарат

2.1. Математическая модель руслового стока

Эта модель относится к классу детерминированных динамических моделей с распределенными параметрами, так как описывает изменение характеристик потока (расхода воды Q или площади живого сечения F) не только во времени t, но и вдоль русла реки (координата x).

Основы Модели руслового стока

Модель предназначена для краткосрочного прогноза (от нескольких часов до 10 суток) расходов Q(x,t) и уровней H(x,t) воды на участках рек. Она позволяет рассчитать, как паводочная волна (или волна попуска с ГЭС) трансформируется при движении вниз по течению. Это необходимо для:

- Своевременного оповещения об опасных уровнях воды.
- Обеспечения нормальной работы судоходства.
- Прогнозирования притока воды в водохранилища.

Модель базируется на предположении о медленно изменяющемся неустановившемся движении воды, которое проявляется в форме так называемых

«длинных волн». Длинными считаются волны, длина которых значительно превышает глубину потока.

В основе модели лежит фундаментальная система уравнений Сен-Венана, которая описывает закон сохранения массы и количества движения для одномерного потока в открытом русле.

Уравнение неразрывности (Закон сохранения массы)

Отражает тот факт, что изменение объема воды на участке реки равно разности входящего и выходящего расходов с учетом бокового притока.

$$\partial F \partial t + \partial Q \partial x = \epsilon(x,t) \quad (2.1)$$

где:

- F — площадь живого сечения русла [м2].
- Q — расход воды [м3/с].
- x — продольная координата [м].
- t — время [с.
- є — интенсивность бокового притока (или оттока, например, на фильтрацию) [м2/с].

Связывает изменение скорости потока с действующими силами (силой тяжести, силой трения, силами инерции).

$$\partial x - \partial x \partial H = C2 \cdot R \cdot F2Q2 + gF1 \partial t \partial Q + gF22\alpha Q \partial x \partial Q \quad (2.2)$$

где:

- H — уровень воды [м].
- C — коэффициент Шези (характеризует пропускную способность русла).
- R — гидравлический радиус [м][м] (для широких русел ≈ глубине потока h).

- g — ускорение свободного падения (≈ 9.81 м/с²).
- α — коэффициент Кориолиса (учитывает неравномерность распределения скоростей в сечении).

Решение полной системы Сен-Венана сопряжено с большими математическими трудностями, поэтому в практике гидрологических прогнозов часто используются упрощенные модели.

Наиболее популярным и удобным для реализации является метод кинематической волны. Его физическая суть заключается в том, что

Для кинематической волны принимается, что связь между расходом Q и площадью живого сечения F (а следовательно, и уровнем H) является однозначной, как при установившемся движении:

$$Q=f(F,x) \quad (2.3)$$

На практике это часто аппроксимируется линейной зависимостью $Q=a\cdot F$ где a — скорость перемещения волны (кинематическая скорость, [м/с]).

Подставляя $Q=aF$ в уравнение неразрывности, получаем:

$$\partial F\partial t+a\partial F\partial x=\epsilon \quad (2.4)$$

Это уравнение называется уравнением кинематической волны.

Для численного решения используется метод конечных разностей (метод сеток). В учебном пособии предлагается явная конечно-разностная схема:

$$Fi+1,j-Fi,j\Delta t+aFi,j-Fi,j-1\Delta x=\epsilon i,j \quad (2.5)$$

Отсюда получается формула для прогноза:

$$Fi+1,j=Fi,j-a\Delta t\Delta x(Fi,j-Fi,j-1)+\epsilon i,j\Delta t \quad (2.6)$$

где:

- j — индекс узла по длине (расстоянию).

- i — индекс узла по времени.

Явная схема требует соблюдения условия Куранта (или условие устойчивости схемы):

$$a\Delta t\Delta x \leq 1 \quad (2.7)$$

Смысл условия: скорость волны не должна превышать скорость перемещения информации по сетке за один шаг по времени.

Модель руслового стока может быть расширена для учета водообмена с грунтовыми водами (документ 1, глава 7). В этом случае в правую часть уравнения (коэффициент $\epsilon\epsilon$) добавляется член $\pm k\phi(Нр - Нгр)$, где:

- k — коэффициент фильтрации (скорость водообмена).
- Н — уровень воды в реке.
- Нгр — уровень грунтовых вод.
    - Если Нр>Нгр, вода фильтруется из реки в грунт (потери).
    - Если Нр<Нгр, грунтовые воды питают реку (приток).

Достоинства:

1. Простота: Легко реализуется численно.
2. Эффективность: Позволяет рассчитывать трансформацию длинных паводочных волн на равнинных реках.
3. Наглядность: Дает хорошее качественное и количественное описание процесса при правильно подобранных параметрах.

Ограничения:

1. Неприменимость к коротким волнам: Не описывает резкие, кратковременные паводки на горных реках (где велики силы инерции).

2. Не описывает «петлю» расхода: Не может моделировать ситуацию, когда одному и тому же уровню в точке соответствуют разные расходы на подъеме и на спаде волны (учет этого требует полных уравнений Сен-Венана или расчетно-измерительной модели, основанной на уравнении Риккати).

Модель руслового стока в форме кинематической волны является мощным и апробированным инструментом гидрологического прогнозирования. Она позволяет с приемлемой для практики точностью предсказывать ход уровней и расходов воды на участках рек при прохождении половодий и паводков, особенно когда время добегания больше расчетного шага по времени.

Модель руслового стока была рассчитана по множеству таблиц, ниже приведён порядок выполнения расчёта:

Для расчётов нужны следующие характеристики:

L =	201	км
Δx =	67	км
Δt =	0,5	сут
a =	0,6	км/сут
q =	-0,03	см/сут
Σ|δ| =	3,7	

Таблица 2.1. Расчёт главных параметров модели на участке г. Орск – с. Донское за 2020 год.

Где:

L – длина участка.

Δx – шаг по расстоянию, он был принят за 1/3.

Δt – шаг по времени.

a - скорость перемещения волны.

q - интенсивность бокового притока.

Σ|δ| - Сумма погрешностей

день	0	67	134	201	IδI
1	187,37	160,16	132,95	132,95	0
1,5	187,365	160,3	133,1	132,9	
2	187,36	160,4	133,2	132,9	0,0
2,5	187,365	160,5	133,3	132,9	
3	187,37	160,6	133,4	132,9	0,1
3,5	187,385	160,7	133,5	132,9	
4	187,4	160,8	133,6	132,9	0,2
4,5	187,39	160,9	133,7	132,9	
5	187,38	161,1	133,9	132,8	0,3
5,5	187,38	161,2	134,0	132,8	
6	187,38	161,3	134,1	132,8	0,3
6,5	187,37	161,4	134,2	132,8	
7	187,36	161,5	134,3	132,8	0,4
7,5	187,33	161,6	134,4	132,8	
8	187,3	161,7	134,5	132,8	0,4
8,5	187,285	161,8	134,6	132,8	
9	187,27	161,9	134,8	132,8	0,2
9,5	187,26	162,0	134,9	132,8	
10	187,25	162,1	135,0	132,8	0,2
10,5	187,245	162,2	135,1	132,8	
11	187,24	162,3	135,2	132,8	0,1
11,5	187,23	162,4	135,3	132,8	
12	187,22	162,5	135,4	132,8	0,0
12,5	187,215	162,6	135,5	132,8	
13	187,21	162,7	135,7	132,8	0,0
13,5	187,21	162,8	135,8	132,7	
14	187,21	162,9	135,9	132,7	0,0
14,5	187,215	163,0	136,0	132,7	
15	187,22	163,1	136,1	132,7	0,0
15,5	187,235	163,2	136,2	132,7	
16	187,25	163,3	136,3	132,8	0,1
16,5	187,27	163,4	136,4	132,8	
17	187,29	163,5	136,6	132,8	0,1
17,5	187,29	163,6	136,7	132,8	
18	187,29	163,7	136,8	132,8	0,1
18,5	187,285	163,8	136,9	132,8	
19	187,28	163,9	137,0	132,8	0,1
19,5	187,27	164,0	137,1	132,8	
20	187,26	164,1	137,2	132,8	0,1
20,5	187,255	164,2	137,3	132,8	

21	187,25	164,3	137,5	132,8	0,1
21,5	187,25	164,4	137,6	132,8	
22	187,25	164,5	137,7	132,8	0,0
22,5	187,25	164,6	137,8	132,8	
23	187,25	164,6	137,9	132,8	0,0
23,5	187,245	164,7	138,0	132,8	
24	187,24	164,8	138,1	132,8	0,0
24,5	187,23	164,9	138,2	132,9	
25	187,22	165,0	138,3	132,9	0,1
25,5	187,22	165,1	138,4	132,9	
26	187,22	165,2	138,6	132,9	0,3
26,5	187,215	165,3	138,7	132,9	
27	187,21	165,4	138,8	132,9	0,3
27,5	187,205	165,5	138,9	132,9	
28	187,2	165,5	139,0	132,9	0,1
28,5	187,195	165,6	139,1	132,9	
29	187,19	165,7	139,2	133,0	0,0
29,5	187,19	165,8	139,3	133,0	
30	187,19	165,9	139,4	133,0	0,0
30,5	187,19	166,0	139,5	133,0	
31	187,19	166,1	139,7	133,0	0,0

Таблица 2.2. расчёт погрешностей на участке г. Орск – с. Донское за 2020 год.

2.2. Критерии оценки прогноза

Прежде чем использовать любую методику прогноза на практике, ее нужно объективно оценить. Существует два главных условия такой оценки:

Это означает, что оценка не должна зависеть от личного мнения прогнозиста. Нужны четкие, воспроизводимые критерии.

Критерий должен позволять сравнивать разные методики между собой и выбирать наиболее эффективную.

Для того чтобы применять математическую статистику, существует важное допущение: Ошибки каждого прогноза случайны, а их распределение подчиняется уравнению нормального распределения Гаусса.

Хотя распределение гидрологических величин часто асимметрично, в диапазоне обеспеченности от 10% до 90% оно близко к нормальному. Это оправдывает использование аппарата нормального распределения.

формула плотности нормального распределения (1.1)

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} \quad (2.8)$$

В нормальном распределении есть важное правило: в интервале среднее ± 0,674σ находится ровно 50% всех значений случайной величины.

Это число 0,674σ называется вероятным отклонением.

Ключевая идея: В гидрологических прогнозах за допустимую погрешность прогноза (δ_доп) принимается именно это вероятное отклонение.

Это означает, что если прогноз оправдался, то ошибка 50% прогнозов будет не больше δ_доп, а 50% — больше. Это стандартный, общепринятый в гидрологии "порог" точности.

В зависимости от типа прогноза и того, что мы знаем на момент его выпуска, используется одна из двух формул.

А: Краткосрочные прогнозы (или прогнозы во время развития процесса). Используется формула (1.4): δ_доп = ±0,674 * σ_Δ

σ_Δ - это среднее квадратическое отклонение изменения прогнозируемой величины за период заблаговременности прогноза.

$$\sigma_\Delta = \sqrt{[\ \Sigma(\Delta_i - \Delta_{ср})^2 / (n-1)\ ]} \quad (2.9)$$

Δ_i = изменение величины за период (например, уровень воды за 3 суток в i-м году).

Δ_ср = среднее многолетнее изменение.

n = число наблюдений.

Для краткосрочного прогноза часто известна текущая тенденция. Суть в том, насколько точно предсказывается изменение, а не абсолютная величина.

Б: Долгосрочные прогнозы (до начала половодья). Используется формула:

$$\delta_доп = \pm 0{,}674 * \sigma \quad (2.10)$$

σ - это среднее квадратическое отклонение самой прогнозируемой величины от её среднего многолетнего значения (нормы).

$$\sigma = \sqrt{[\ \Sigma(y_i - y_ср)^2 / (n-1)\ ]} \quad (2.11)$$

y_i = значение величины в i-м году (например, максимальный уровень половодья).

y_ср = средняя многолетняя норма.

Для долгосрочного прогноза мы предсказываем саму величину, сравнивая её с климатической нормой.

Нужно сравнить реальную точность методики с тем, что мы получили бы, просто назвав "норму".

Для этого вводится средняя квадратическая погрешность методики (S) по формуле:

$$S = \sqrt{[\ \Sigma(y_i - y_i')^2 / (n - m)\ ]} \quad (2.12)$$

Где:

y_i — фактическое значение.

y_i' — предсказанное значение по нашей методике.

n — число членов ряда.

m — число степеней свободы (обычно равно количеству постоянных

коэффициентов в нашем прогностическом уравнении).

Теперь вычисляем отношение S / σ (или S / σ_Δ в зависимости от типа прогноза).

Если S/σ = 1: Эта методика не дает никакого выигрыша по сравнению с примитивным прогнозом "ожидаемая величина равна норме".

Если S/σ < 1: Предсказывается лучше, чем "норма". Чем меньше отношение, тем эффективнее методика.

Если S/σ > 1: Методика предсказывает хуже, чем просто "норма". Она бесполезна (и даже вредна).

Существуют четкие численные пороги, при которых методику можно считать приемлемой для практического использования. Эти пороги зависят от длины ряда наблюдений (n):

При $n \leq 15$ (короткий ряд): $S/\sigma \leq 0{,}70$

При $15 < n < 25$ (средний ряд): $S/\sigma \leq 0{,}75$

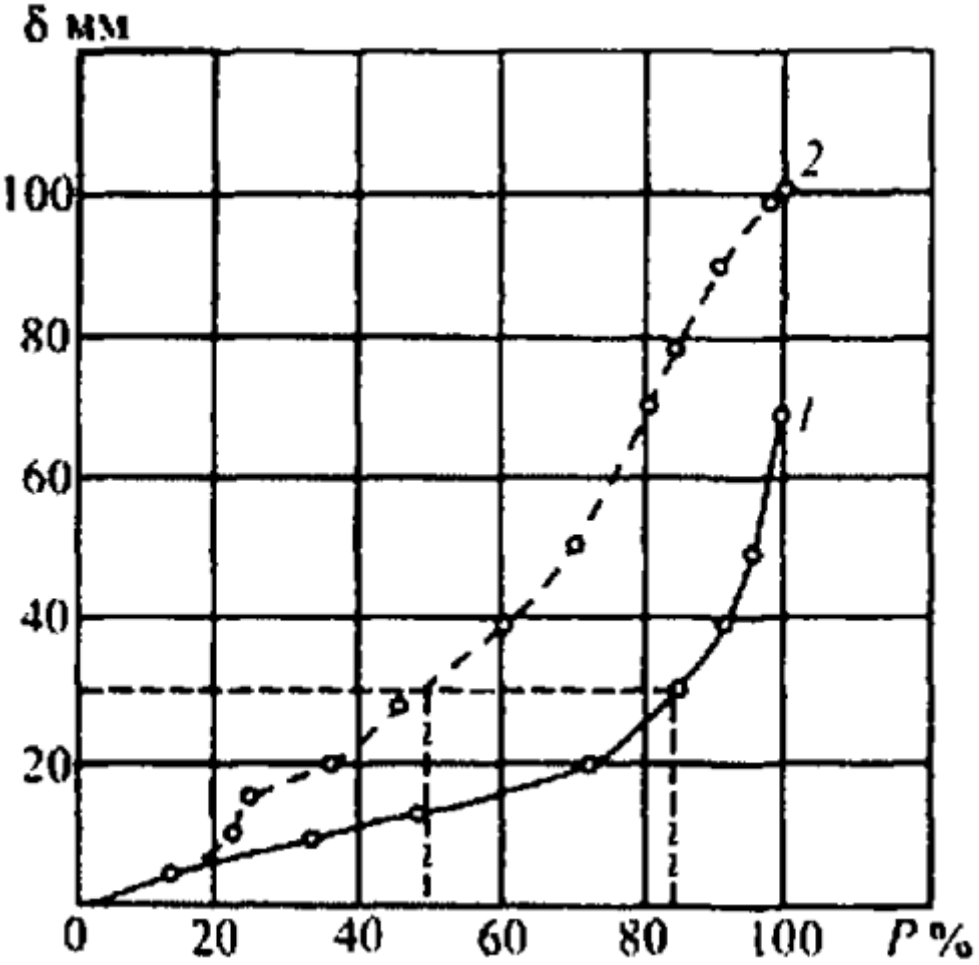
При $n \geq 25$ (длинный ряд): $S/\sigma \leq 0{,}80$

Например: Если у нас есть 30 лет наблюдений, и мы разработали методику, то её среднеквадратическая ошибка (S) должна составлять не более 80% от естественной изменчивости (σ). Только тогда методику можно выпускать в оперативную практику.

Нельзя слепо доверять только числу S/σ или коэффициенту корреляции. Есть важные моменты:

Коэффициент корреляции (r) может обманывать. Высокий r получается не только при хорошей связи, но и при наличии систематической ошибки (например, методика всегда завышает расходы на 20%, но следует за колебаниями — корреляция будет высокой, а прогноз — плохим).

Дополнительный способ оценки — кривые обеспеченности На этом рисунке показано:



Кривая 1 — погрешности прогнозов по методике.

Кривая 2 — отклонения от нормы.

При допустимой погрешности (вероятное отклонение) в 32 мм:

Обеспеченность прогноза по методике: 86% (то есть 86% ошибок меньше 32 мм).

- Обеспеченность прогноза по норме: 50%.

Хорошая методика сдвигает кривую обеспеченности влево и вверх, давая меньшие ошибки при той же допустимой погрешности. Разница в 36% (86% - 50%) — это и есть количественное выражение "выигрыша" методики.

2.3 Поиск решения

«Поиск решения» (Solver) представляет собой надстройку для приложения Microsoft Excel, которая расширяет стандартный набор функций программы инструментами для решения сложных оптимизационных задач. По своей сути это мощный аналитический инструмент, предназначенный для автоматизированного поиска оптимального значения целевой ячейки путем динамического изменения значений других, зависимых от нее ячеек, при обязательном соблюдении ряда заданных пользователем условий и граничных параметров. Ключевое отличие «Поиска решения» от более простых инструментов Excel, таких как «Подбор параметра», заключается в его способности обрабатывать модели с множеством переменных и сложной системой взаимосвязанных ограничений.

Для функционирования данной надстройки пользователь должен формализовать задачу в терминах математической оптимизации. Первым необходимым элементом является целевая функция, размещенная в отдельной ячейке, значение которой требуется максимизировать, минимизировать или привести к конкретному числовому значению. Вторым элементом выступает набор ячеек, значения в которых надстройка будет изменять в процессе поиска. Эти ячейки, как правило, оказывают прямое или косвенное влияние на целевую функцию через формулы, связывающие их между собой. Третьим и наиболее важным элементом являются ограничения — условия, которые накладываются на значения изменяемых ячеек или на промежуточные результаты расчетов.

«Поиск решения» поддерживает различные типы ограничений, включая неравенства с отношениями «меньше или равно», «больше или равно» и «равно», а также специальные условия, такие как требование целочисленности значений переменных или их принадлежности к бинарному множеству, например только ноль или единица. В зависимости от характера решаемой задачи и типа связей между переменными, надстройка предлагает выбор из нескольких встроенных алгоритмов оптимизации. Для линейных моделей, где все зависимости между переменными пропорциональны, используется высокоэффективный симплекс-метод. Для нелинейных, но гладких моделей применяется метод обобщенного градиента. Для задач с разрывными, недифференцируемыми функциями или для решения задач глобальной оптимизации предназначен эволюционный метод.

После того как все параметры задачи заданы, «Поиск решения» запускает итерационный процесс, многократно подставляя новые значения в изменяемые ячейки и анализируя получившийся результат в целевой ячейке. Программа стремится найти такой набор переменных, который наилучшим образом удовлетворяет целевой функции, не нарушая ни одного из установленных ограничений. По завершении поиска пользователю предоставляется подробный отчет о найденном решении, а также предлагается возможность сохранить полученные значения в исходной таблице или вернуть предыдущие. Кроме того, надстройка может создавать несколько дополнительных отчетов для детального анализа найденного решения. Важно отметить, что «Поиск решения» является надстройкой, которая по умолчанию отключена в стандартной установке Excel. Для ее активации пользователю необходимо выполнить ряд действий в настройках программы, перейдя в раздел управления надстройками, где можно включить этот компонент, после чего его значок становится доступным на ленте инструментов на вкладке «Данные». Данный инструмент находит широкое применение в финансовом моделировании, логистике, производственном планировании, управлении запасами и во многих других областях, требующих принятия оптимальных решений при наличии ресурсных ограничений.

В этой дипломной работе функция “Поиск решения” использовалась для вычисления параметров a (скорость распространения волны) и q (интенсивность бокового притока). В качестве целевой функции послужила сумма погрешностей (Σ|δ|), эти действия нужны для вычисления отношения S/σ

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ВОЛН ПОЛОВОДЬЯ И ПАВОДКОВ НА Р. УРАЛ.

3.1 Выбор расчетных участков

Для реализации модели руслового стока и корректной трансформации паводочной волны была выполнена декомпозиция речной сети бассейна р. Урал на отдельные расчетные участки. Протяженность участков и расположение граничных створов определялись, исходя из двух ключевых критериев: гидрологического (условия приточности) и гидротехнического (степень зарегулированности).

Критериями для выделения расчетных участков являются:

Гидрологическая однородность. В соответствии с методологией, изложенной в «Руководстве по гидрологическим прогнозам» и учебнике «Гидрологические прогнозы», основой для краткосрочных прогнозов движения паводковых вод служат либо бесприточные, либо слабоприточные участки. Это требование диктуется необходимостью упрощения уравнений динамики потока. На участках со значительным боковым притоком или впадением крупных притоков искажается форма гидрографа, а время добегания становится нестабильным, что приводит к недопустимым погрешностям при использовании метода кинематической волны или метода соответственных уровней.

Отсутствие (или минимальное влияние) зарегулированности. Искусственное регулирование стока плотинами (в первую очередь, Ириклинским водохранилищем) и гидроузлами вносит существенную нелинейность в движение волны попуска, не описываемую классическими моделями естественного руслового стока. Для адекватного расчета трансформации волны в модели кинематической волны необходимо, чтобы участок был незарегулированным (либо влияние регулирования было сведено к минимуму за счет задания граничных условий по фактическим сбросам).

Бассейн р. Урал характеризуется высокой гидрографической асимметрией. Основная масса притоков поступает с левого берега (притоки, стекающие с Общего Сырта). Однако в среднем и нижнем течении (ниже г. Оренбург) плотность речной сети снижается, крупные притоки (Илек, Заживная) вносят вклад в сток, но он не является доминирующим по сравнению с транзитным стоком основного русла. Также ключевым фактором является наличие в верховьях Ириклинского водохранилища, которое аккумулирует сток и полностью меняет естественный гидрограф в верхней части бассейна (у г. Орск).

Исходя из вышеперечисленных требований, для построения модели были выбраны следующие репрезентативные гидрологические посты, разбивающие р. Урал на четыре характерных участка:

Участок «г. Орск — с. Донское». Этот участок расположен в зоне выклинивания влияния Ириклинского водохранилища. Ниже г. Орск режим стока постепенно возвращается к естественному. На данном отрезке отсутствуют крупные притоки, способные резко деформировать волну половодья. Участок является условно-бесприточным и незарегулированным, что делает его идеальным для калибровки параметров модели сопротивления русла и скорости добегания в условиях пересеченной местности на начальном этапе движения паводка. Длина - участка 201 км

Участок «с. Донское — г. Оренбург». Данный отрезок характеризуется спокойным равнинным течением и минимальной приточностью. Хотя здесь фиксируется некоторое увеличение водности за счет таяния снега на прилегающих водосборах, доля бокового притока по отношению к основной массе воды, идущей из верховьев, не превышает пороговых значений для применения упрощенных схем (обычно менее 10–15% от транзитного расхода). Участок незарегулирован, русловые деформации минимальны. Выбор этого участка позволяет оценить трансформацию волны (распластывание и снижение пика) на значительной протяженности равнинной реки без искажающего влияния притоков. Длина - участка 229 км

Участок «г. Оренбург — с. Илек». Этот участок является наиболее ответственным с точки зрения формирования катастрофических паводков в нижнем течении. Несмотря на наличие здесь впадения р. Сакмары (которая вносит существенный вклад в паводок), участок «г. Оренбург — с. Илек» берет начало ниже устья Сакмары. Таким образом, влияние основного притока учитывается через задание граничных условий в верхнем створе (г. Оренбург) после объединения вод Урала и Сакмары. На рассматриваемом отрезке (до с. Илек) отсутствуют новые крупные притоки, искажающие форму гидрографа. Русло здесь характеризуется значительной шириной и развитой поймой, что требует отдельного параметрического описания, но не нарушает требования «бесприточности». Длина - участка 209 км

Участок «с. Уральск — г. Орск». Этот участок выбран для завершающего этапа расчетов. Хотя формально он расположен вверх по течению от г. Орск, в рамках построения каскадной схемы моделирования этот участок (или связка «Верховья — Орск») необходим для задания начальных условий (расходов воды), поступающих в верхнюю часть моделируемой системы непосредственно из-под плотины Ириклинского водохранилища и с неосвещенной наблюдениями верхней части бассейна. Длина - участка 72 км

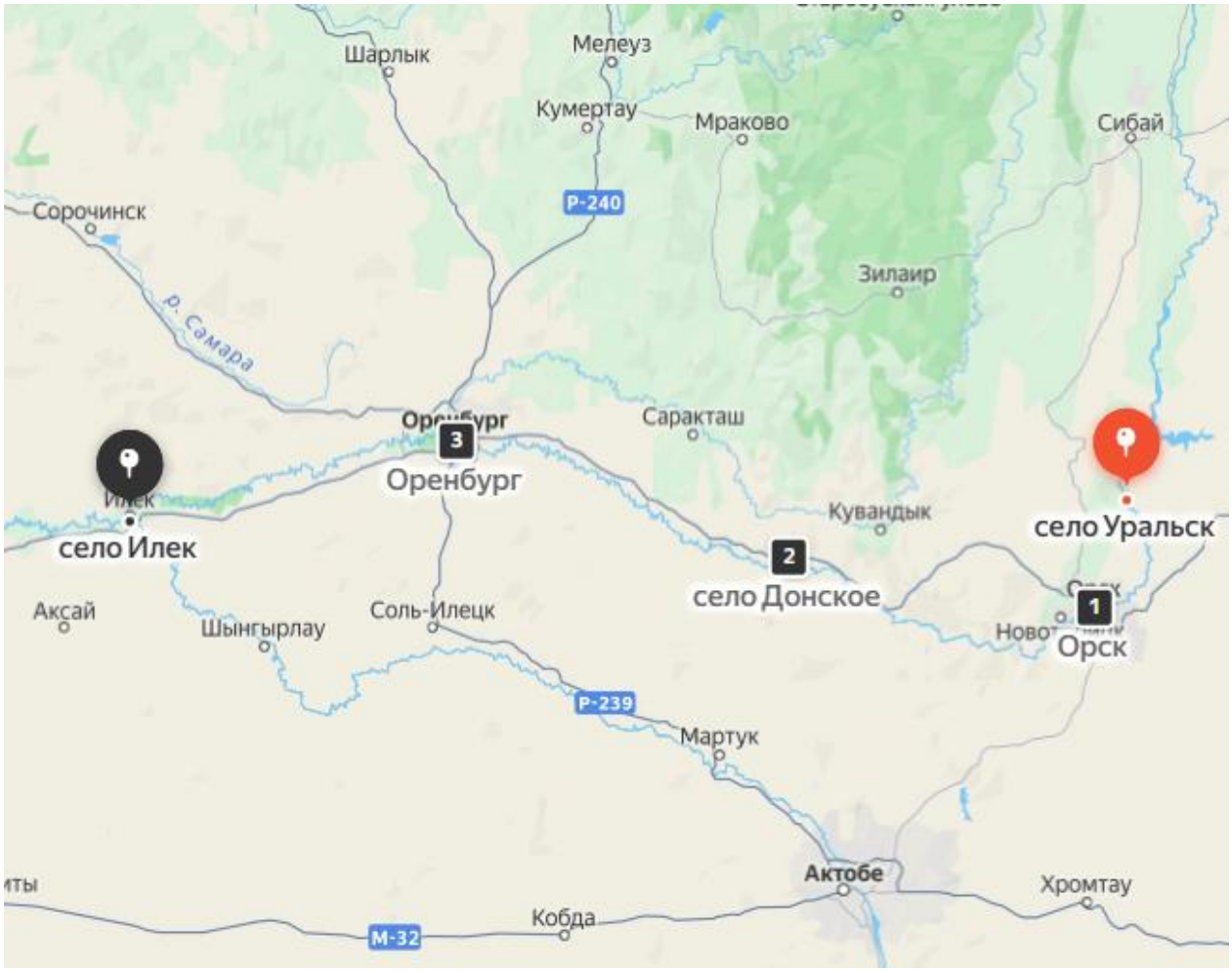


Рис. 3.1. Карта расположения выбранных гидрологических постов.

Совокупность выбранных участков (Орск–Донское, Донское–Оренбург, Оренбург–Илек) формирует транзитную систему, в которой выполняются основные допущения метода кинематической волны (отсутствие боковой приточности, естественный режим). Нижний створ (с. Илек) является контрольным, позволяющим верифицировать прогноз трансформации волны. Верхняя граница модели (г. Орск) фиксирует входной гидрограф, сформированный в результате снеготаяния и сработки Ириклинского водохранилища, что соответствует принципам построения детерминированных моделей руслового стока, изложенным в работе Георгиевского и Шаночкина

(«Гидрологические прогнозы», разделы, посвященные учету закономерностей движения воды в русле).

3.2 Параметризация модели руслового стока

В ходе расчётов было создано 4 таблицы для параметризации модели руслового стока, вот пример одной из них:

		р. Урал - с. Донское - р. Урал - г. Оренбург								
		3	4	5	6	7	8	9	10	11
20	a	0,7	0,007	0,7	0,1	0,3	-0,002	0,3	0,1	0,003
	q	0,0	0,047	-0,048	-0,001	-0,004	0,005	-0,01	-0,002	0,006
	S/σ	0,38	1,36	0,22	0,37	0,61	1,15	0,15	0,57	1,00
21	a	1,1	0,0	0,7	0,3	0,003	-0,001	0,2	0,005	-0,2
	q	-0,02	-0,1	-0,04	-0,004	0,003	0,002	-0,01	-0,002	0,007
	S/σ	0,62	0,31	0,12	0,89	1,45	2,24	1,02	0,29	1,02
22	a	1,8	0,03	0,6	0,5	0,1	-0,018	-0,035	0,2	0,4
	q	-0,1	-0,06	-0,01	-0,02	-0,001	-0,001	-0,001	-0,002	-0,001
	S/σ	0,45	0,39	1,13	0,21	0,58	0,43	0,63	0,91	0,98
23	a	96,9	20,0	57,3	28,1	75,0	3,0	2,4	5,0	9,3
	q	33,1	-1,4	0,0	-1,1	-2,3	-0,4	-0,4	-0,4	-1,1
	S/σ	0,30	0,06	0,61	0,83	0,72	0,39	0,25	0,57	1,06

Таблица 3.2 Параметризация модели руслового стока на участке р. Урал - с. Донское - р. Урал - г. Оренбург.

Зелёным цветом отмечено согласие ($S/\sigma < 0,8$), а Красным цветом отмечено несогласие ($S/\sigma > 0,8$).

Для каждого года, месяца параметра было рассчитано среднее значение.

3.3 Оценка расчёта на независимом материале.

В учебнике «Гидрологические прогнозы» подчеркивается, что любые оценки точности прогностической методики, полученные на том материале, который использовался для ее разработки и настройки, не могут считаться

окончательными. Они справедливы только для этой конкретной выборки. При переходе на независимый материал, то есть при проверке модели на данных, которые не участвовали в её создании, эти оценки объективно ухудшаются. В связи с этим вводится важное понятие устойчивости прогностического уравнения. Методика считается устойчивой и пригодной для практического использования только в том случае, если ухудшение показателей качества при переходе на независимые данные не выходит за определенные допустимые пределы. Для количественной оценки этого допустимого ухудшения авторами предлагается специальная формула, позволяющая рассчитать, насколько может снизиться коэффициент множественной корреляции при проверке на новом материале.

Практические методы организации проверки

В «Практикуме по моделированию гидрологических процессов» описывается конкретная процедура организации такой проверки, получившая название «скользящий экзамен». Суть метода заключается в том, что весь имеющийся ряд наблюдений циклически разделяется на две части. На каждом шаге небольшой сегмент данных (например, один год) объявляется независимым и временно исключается из процесса настройки модели. По оставшимся данным строится прогностическое уравнение, после чего это уравнение используется для расчета значений на исключенном независимом отрезке. Процедура повторяется до тех пор, пока каждый год или каждый паводок не побывает в роли независимого материала. Такой подход позволяет наиболее объективно оценить, как модель будет вести себя при прогнозировании реальных, заранее неизвестных событий.

Для оценки результатов, полученных на независимом материале, авторы «Практикума» предлагают использовать специальный критерий — коэффициент прогностической информативности. Этот коэффициент вычисляется как обычная корреляция между фактическими наблюдаемыми значениями и теми

значениями, которые были получены в ходе процедуры «скользящего экзамена». Его ключевое отличие от традиционного коэффициента множественной корреляции заключается в том, что он характеризует не способность модели описывать прошлые данные, а именно её прогностическую способность, то есть умение предсказывать неизвестные заранее события.

Важным свойством коэффициента прогностической информативности является то, что его значение не растет бесконечно с усложнением модели, как это происходит с обычным коэффициентом корреляции. Напротив, начиная с определенного момента, добавление в модель новых параметров приводит к снижению этого коэффициента. Это свойство дает исследователю четкое и объективное правило остановки: усложнять модель и добавлять в нее новые параметры имеет смысл только до тех пор, пока растет коэффициент прогностической информативности. Как только его значение начинает падать, дальнейшее усложнение модели становится бессмысленным, так как оно улучшает описание прошлых данных за счет ухудшения реальных прогнозов на будущее.

Было проведено исследование по оценке расчётов на независимом материале, и данные расчёты показали в основном несогласие методики:

Участок	р. Урал - г. Оренбург - р. Урал - г. Илек								
S/σ	2,52	0,58	0,70	1,18	0,43	2,25	0,69	1,39	1,27
Участок	р. Урал - с. Орск - р. Урал - с. Донское								
S/σ	1,79	1,53	1,29	2,90	1,67	0,58	7,32	1,24	3,14
Участок	р. Урал - с. Донское - р. Урал - г. Оренбург								
S/σ	2,17	1,97	2,32	1,29	1,71	1,87	2,24	1,33	1,31
Участок	р. Урал - с. Уральск - р. Урал - г. Орск								
S/σ	2,43	1,74	15,33	1,80	1,36	21,31	0,96	0,78	1,35

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была разработана математическую модель для прогнозирования паводков на реке Урал на основе данных гидрологических постов за 2020-2023 годы. Проведённое исследование позволило сделать следующие основные выводы.

Первым этапом работы стал сбор и первичный анализ гидрологических данных. На основе информации с гидрологических постов (от г. Верхнеуральска до с. Илек) были построены совмещённые графики уровней воды. Эти графики позволили визуализировать и подтвердить известные особенности водного режима реки Урал: четко выраженную волну весеннего половодья, значительную межгодовую изменчивость (контраст между многоводными и маловодными годами), а также синхронность подъёмов и спадов на разных участках реки. Данный этап показал, что исходная информация пригодна для калибровки и верификации моделей.

Вторым этапом были выбраны и обоснованы расчётные участки для моделирования. На основе требований к бесприточности и незарегулированности русла были выделены участки Орск–Донское, Донское–Оренбург и Оренбург–Илек, а также участок от Уральска для задания граничных условий. Такой выбор формально соответствует методике применения упрощенных моделей руслового стока (кинематической волны).

Далее была разработана модель и выполнена её параметризация на калибровочном периоде 2020-2022 годов. На этом этапе были подобраны параметры модели, обеспечивающие наилучшее совпадение расчётных и фактических гидрографов.

Ключевым этапом стала верификация модели на независимом материале 2023 года. В соответствии с требованием объективной оценки модели её эффективность была проверена на данных, не участвовавших в калибровке. Результаты этого этапа показали, что разработанная модель не продемонстрировала приемлемой точности при прогнозировании на новых данных. Полученные значения критериев качества оказались за пределами допустимых значений, установленных для гидрологических прогностических методик.

Анализ причин низкой эффективности модели позволяет выделить несколько факторов. Во-первых, упрощенные модели типа кинематической волны, основанные на линейных или кусочно-линейных зависимостях, недостаточно точно описывают реальное движение паводочной волны на реке Урал, особенно в условиях выхода воды на широкую пойму и при резких изменениях руслоформирующих факторов. Во-вторых, активные русловые процессы (меандрирование, переформирование перекатов), характерные для реки Урал, приводят к изменению морфометрических характеристик русла от года к году, что делает параметры, полученные на калибровочном периоде, нерепрезентативными для верификационного периода. В-третьих, метеорологические условия (температура воздуха, количество и интенсивность осадков, снегозапасы) в год верификации (2023) могли существенно отличаться от калибровочных, что привело к изменению характера формирования стока, не учтённому в модели.

Таким образом, цель работы — разработка пригодной для практического использования прогностической модели — в полном объёме достигнута не была. Полученные результаты свидетельствуют о том, что выбранный класс моделей (упрощенные модели руслового стока) или конкретная их реализация недостаточно адекватно описывают процессы формирования и прохождения паводков на реке Урал. Количественные значения критериев эффективности,

полученные на независимом материале, не соответствуют нормативным требованиям, предъявляемым к оперативным гидрологическим прогнозам.

Список литературы

1) В.В. Коваленко, Е.В. Гайдукова практикум по дисциплине «Моделирование гидрологических процессов. часть 1. динамические модели» (на базе языка С++)

2) Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы. Учебник. - СПб., изд. РГГМУ, 2007. - 436 с.

3) Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных - http://meteo.ru

4) Экстремальные погодно-климатические явления. Веб-ГИС для визуализации и анализа погодно-климатических явлений в России - http://extremeclimate.ru.

5) Ущерб от паводка в Оренбургской области может вырасти до 42 млрд рублей – 2025. – URL: https://www.interfax.ru/russia/1032584.

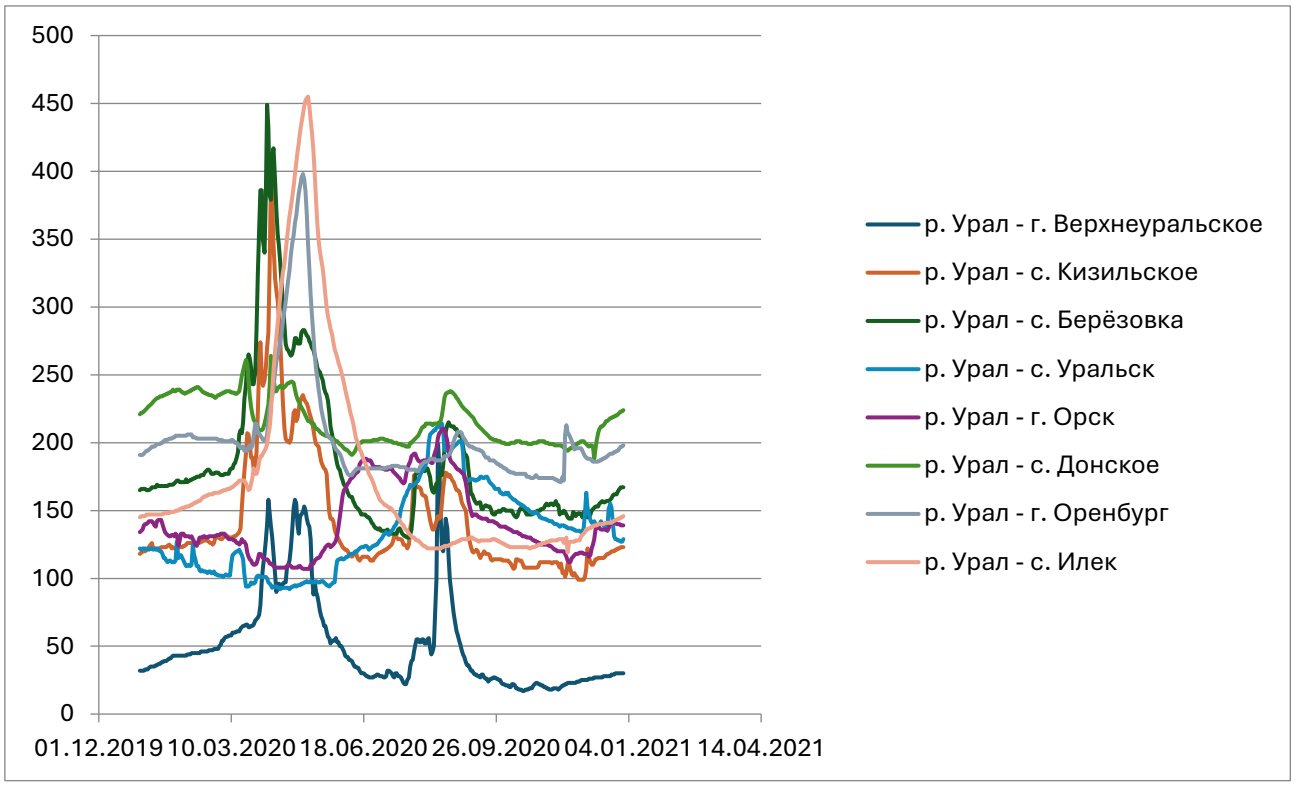
6) Суд в Орске взыскал более 11 млн рублей в пользу пострадавших от прорыва дамбы – 2025. – URL: https://www.interfax.ru/russia/1012547.

7) Спустя два года после разрушительного паводка на Урале никто из чиновников не наказан – 2026. – URL: https://www.interfax.ru/russia/1012589 .

8) Власти Оренбуржья готовятся к предстоящему паводку 2026 года ТАСС – 2026. – URL: https://tass.ru/obschestvo/22994991.

Приложения

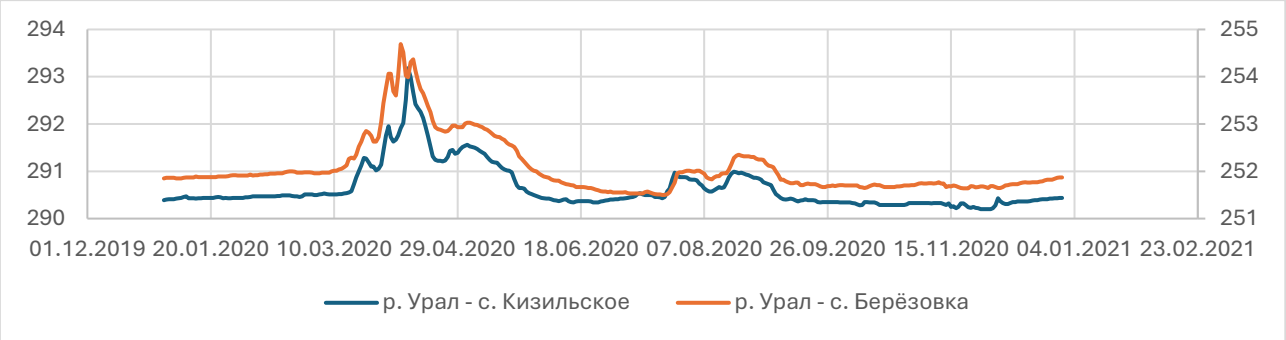
Приложение 1. Совмещённый график уровней воды для всех выбранных постов за 2020 год.



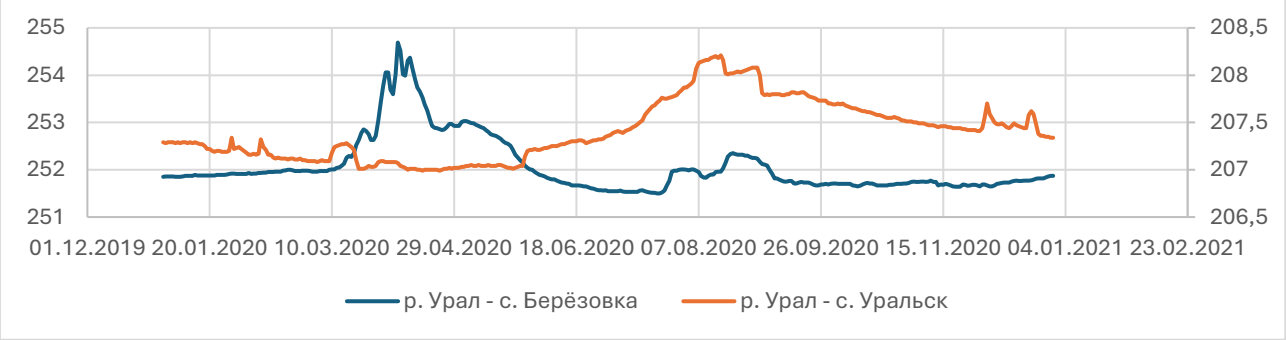
Приложение 2. Совмещённый график уровней воды за 2020 год. р. Урал - г. Верхнеуральское - р. Урал - с. Кизильское



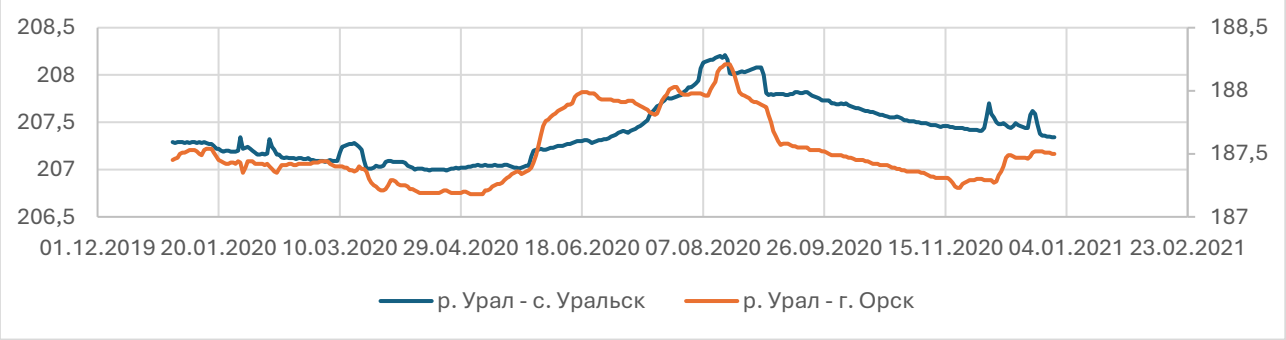
Приложение 3. Совмещённый график уровней воды за 2020 год. р. Урал - с. Кизильское - р. Урал - с. Берёзовка



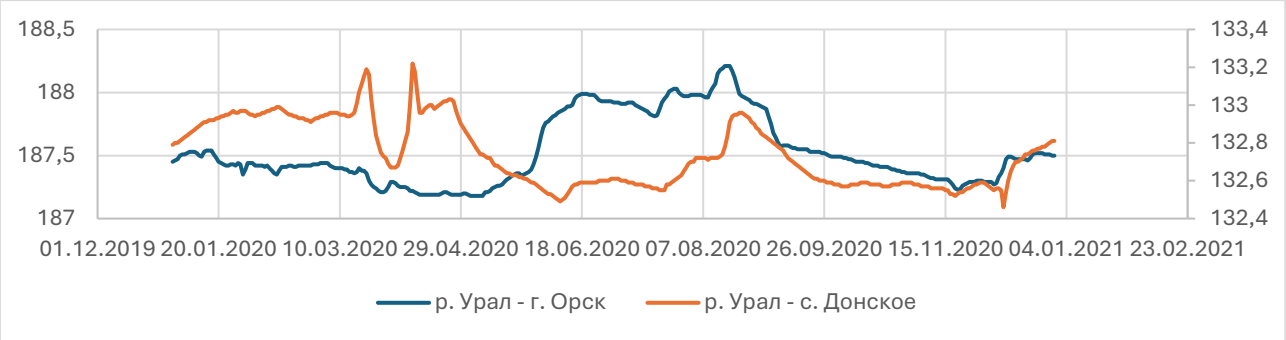
Приложение 4. Совмещённый график уровней воды за 2020 год. р. Урал - с. Берёзовка - р. Урал - с. Уральск



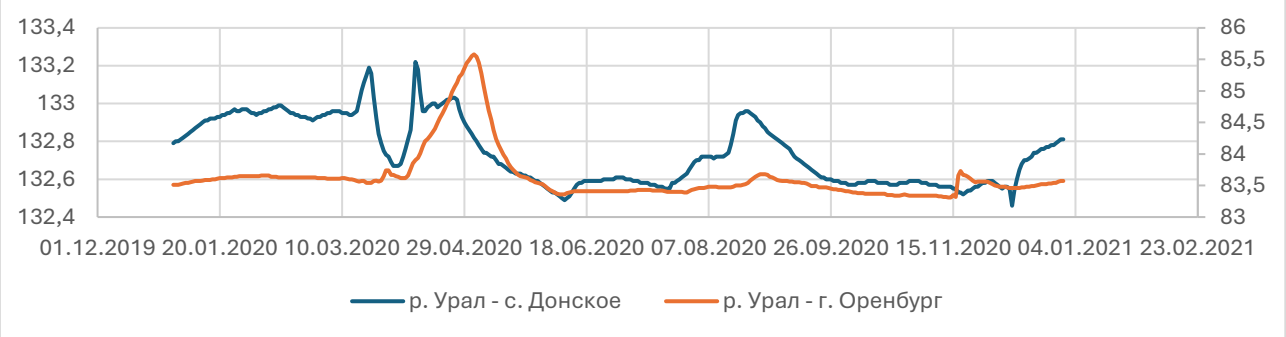
Приложение 5. Совмещённый график уровней воды за 2020 год. р. Урал - с. Уральск - р. Урал - г. Орск



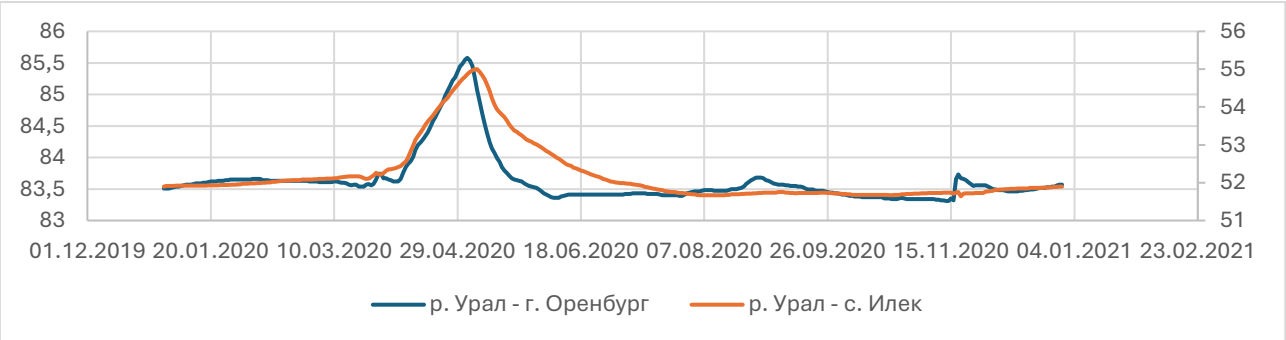
Приложение 6. Совмещённый график уровней воды за 2020 год. Урал - г. Орск - р. Урал - с. Донское



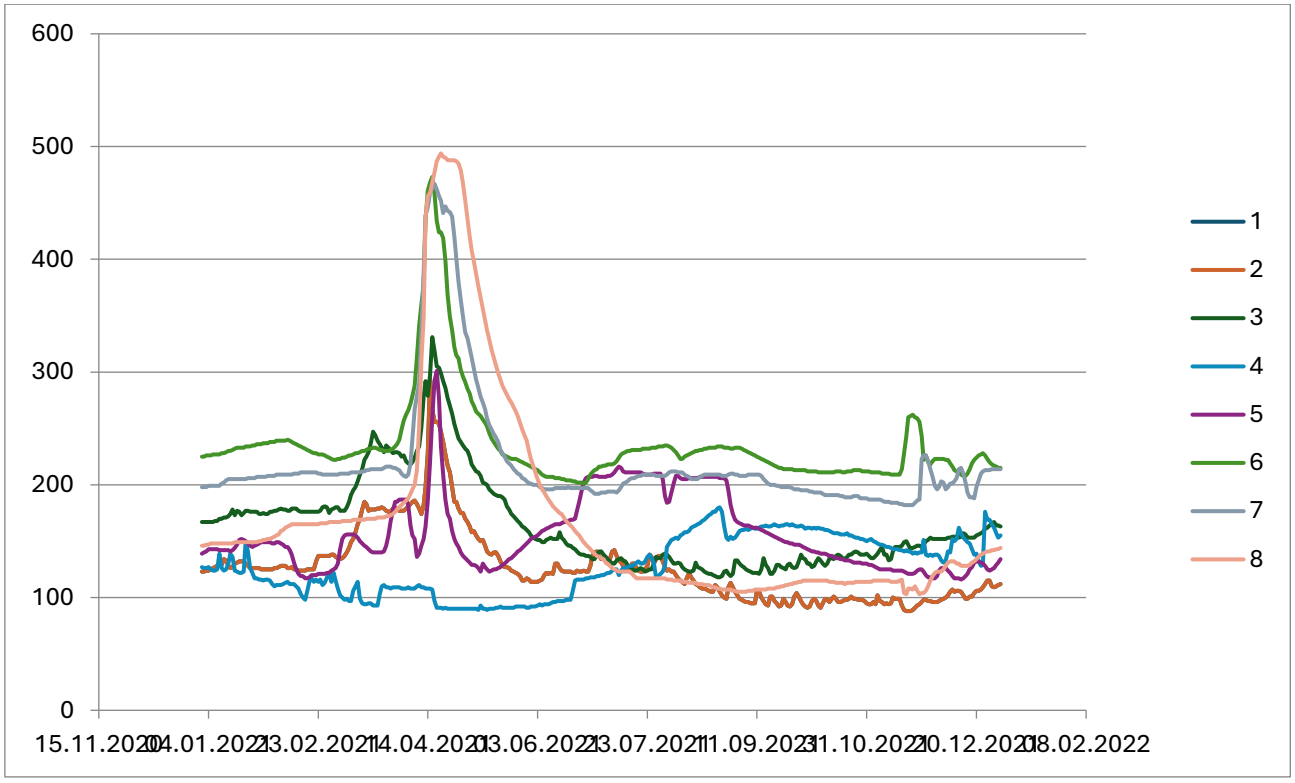
Приложение 7. Совмещённый график уровней воды за 2020 год. р. Урал - с. Донское - р. Урал - г. Оренбург



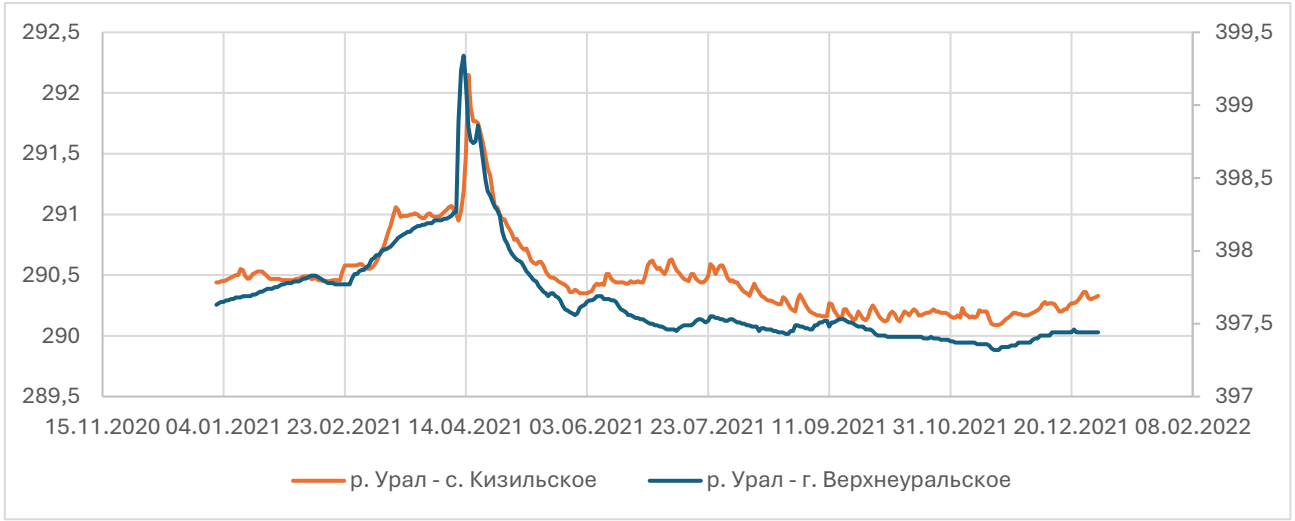
Приложение 8. Совмещённый график уровней воды за 2020 год. р. Урал - г. Оренбург - р. Урал - с. Илек



Приложение 9. Совмещённый график уровней воды для всех выбранных постов за 2021 год.



Приложение 10. Совмещённый график уровней воды за 2021 год. р. Урал - г. Верхнеуральское - р. Урал - с. Кизильское



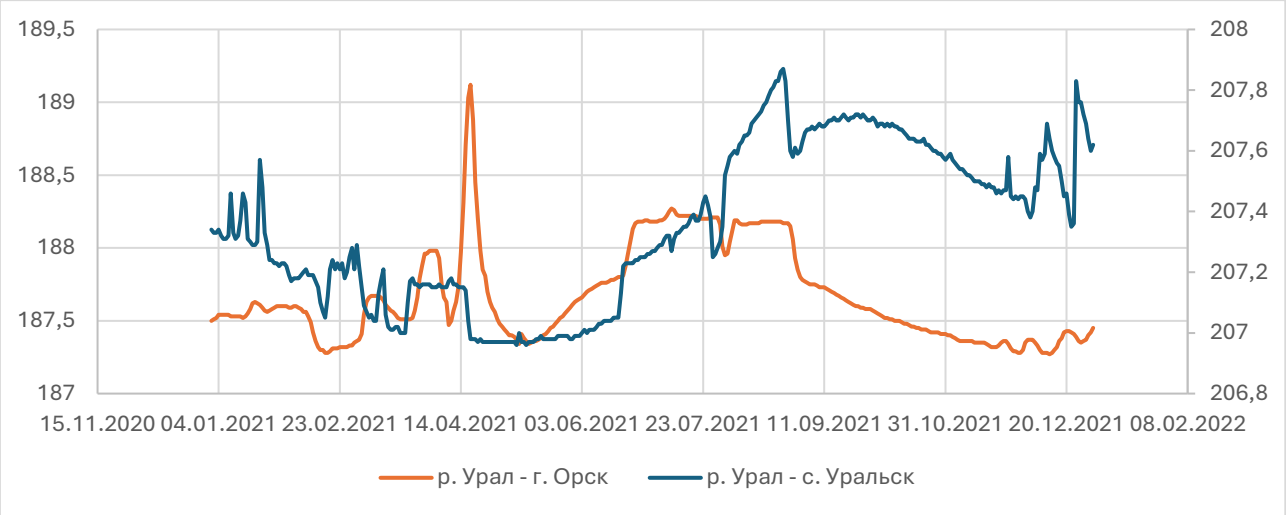
Приложение 11. Совмещённый график уровней воды за 2021 год. р. Урал - с. Кизильское - р. Урал - с. Берёзовка



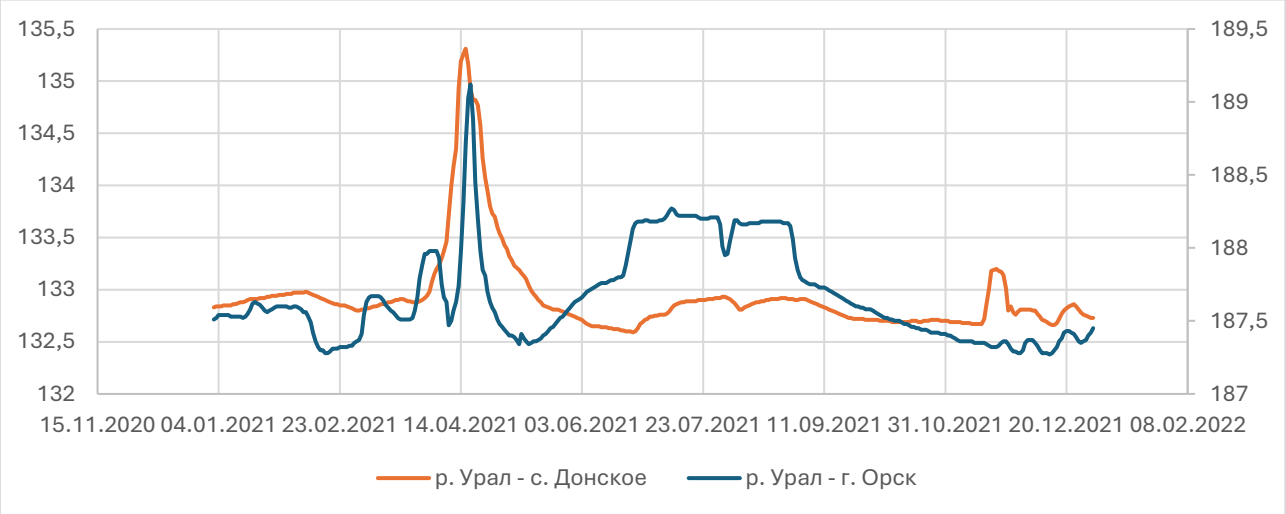
Приложение 12. Совмещённый график уровней воды за 2021 год. р. Урал - с. Берёзовка - р. Урал - с. Уральск



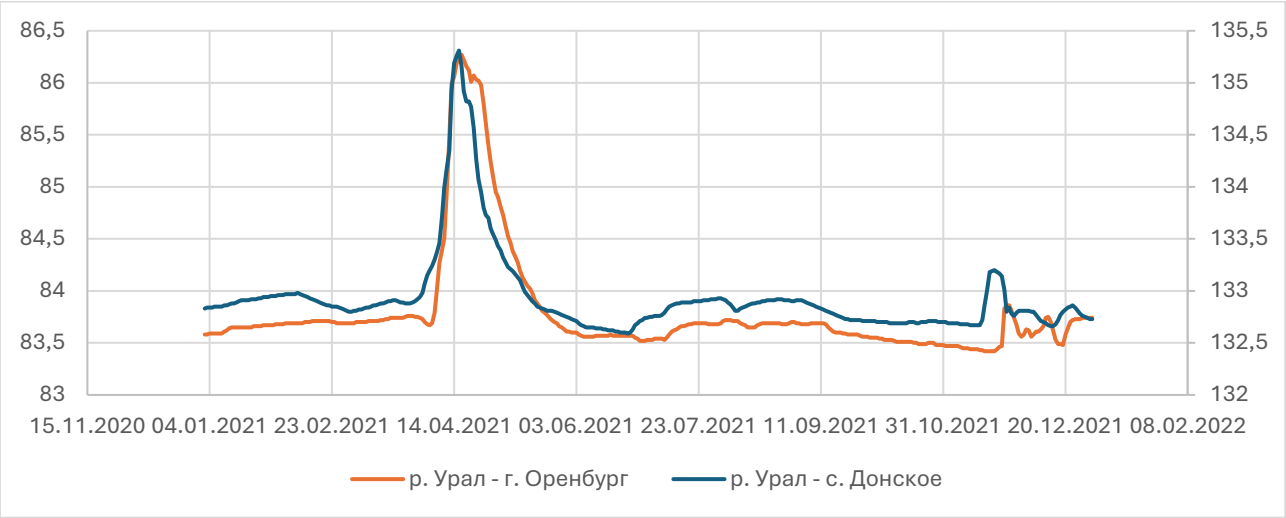
Приложение 13. Совмещённый график уровней воды за 2021 год. р. Урал - с. Уральск - р. Урал - г. Орск



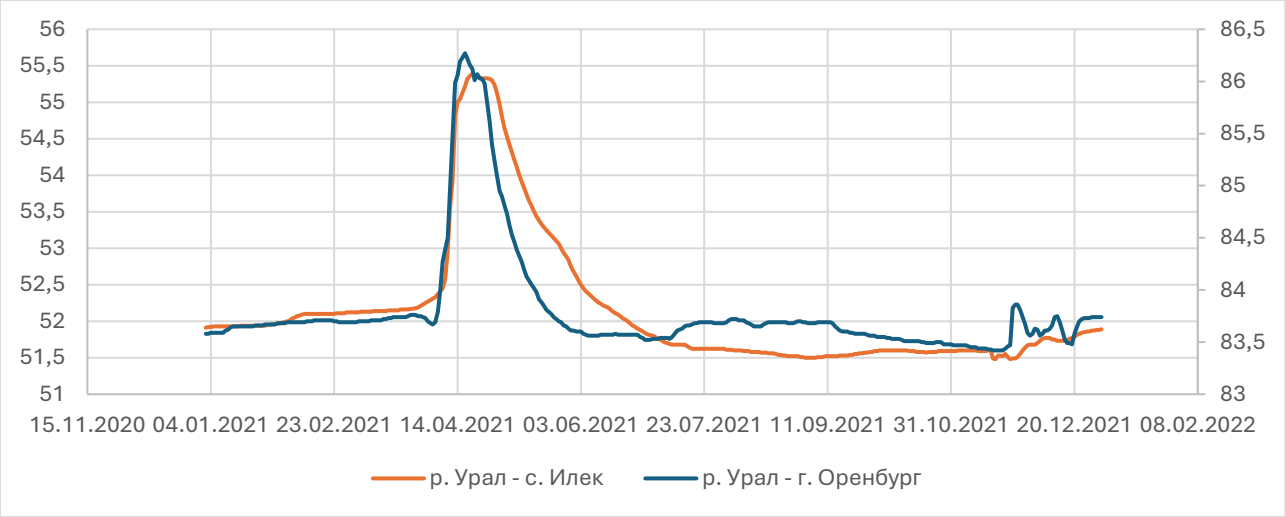
Приложение 14. Совмещённый график уровней воды за 2021 год. Урал - г. Орск - р. Урал - с. Донское



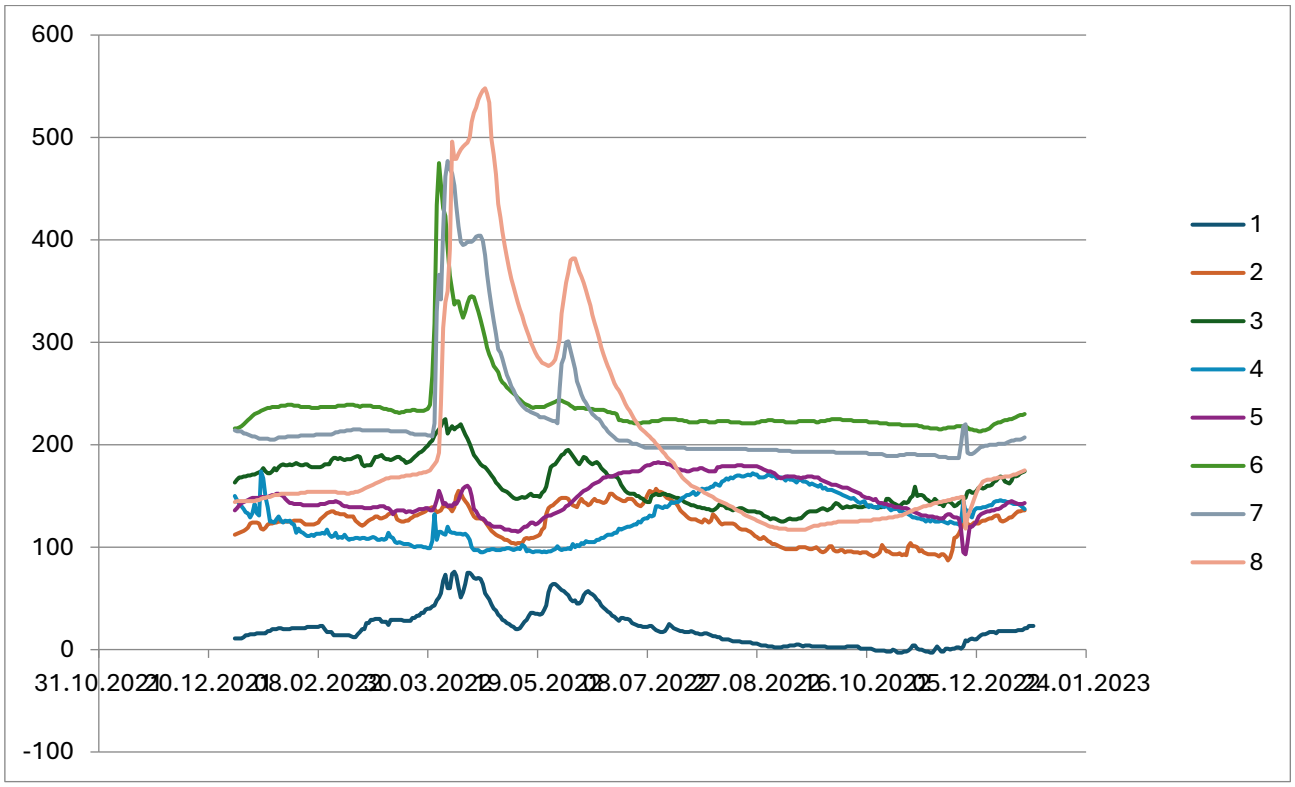
Приложение 15. Совмещённый график уровней воды за 2021 год. р. Урал - с. Донское - р. Урал - г. Оренбург



Приложение 16. Совмещённый график уровней воды за 2021 год. р. Урал - г. Оренбург - р. Урал - с. Илек



Приложение 17. Совмещённый график уровней воды для всех выбранных постов за 2022 год.



Приложение 18. Совмещённый график уровней воды за 2022 год. р. Урал - г. Верхнеуральское - р. Урал - с. Кизильское



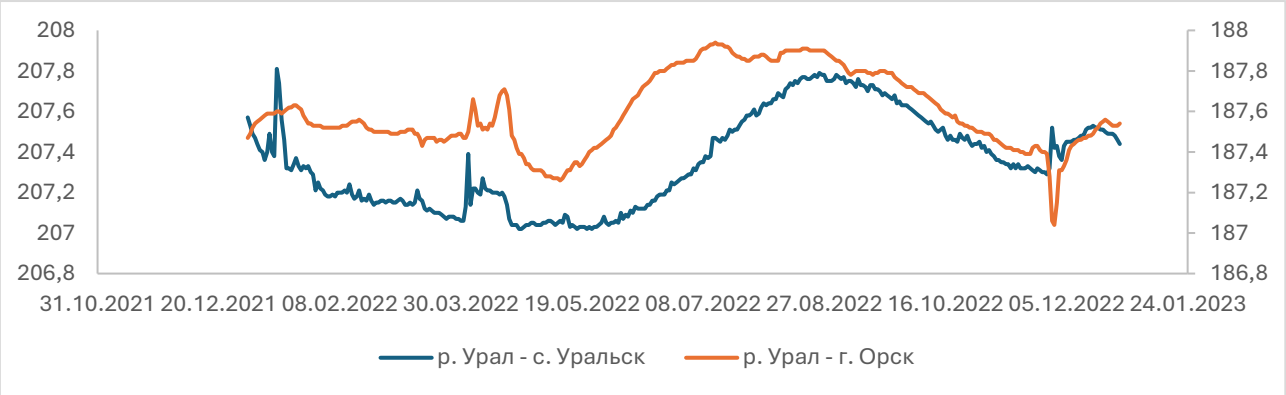
Приложение 19. Совмещённый график уровней воды за 2022 год. р. Урал - с. Кизильское - р. Урал - с. Берёзовка



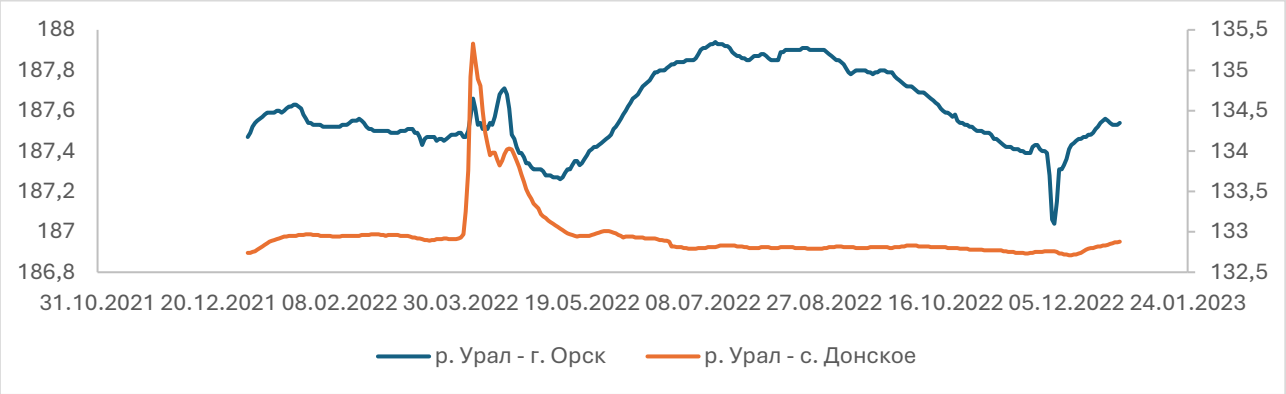
Приложение 20. Совмещённый график уровней воды за 2022 год. р. Урал - с. Берёзовка - р. Урал - с. Уральск



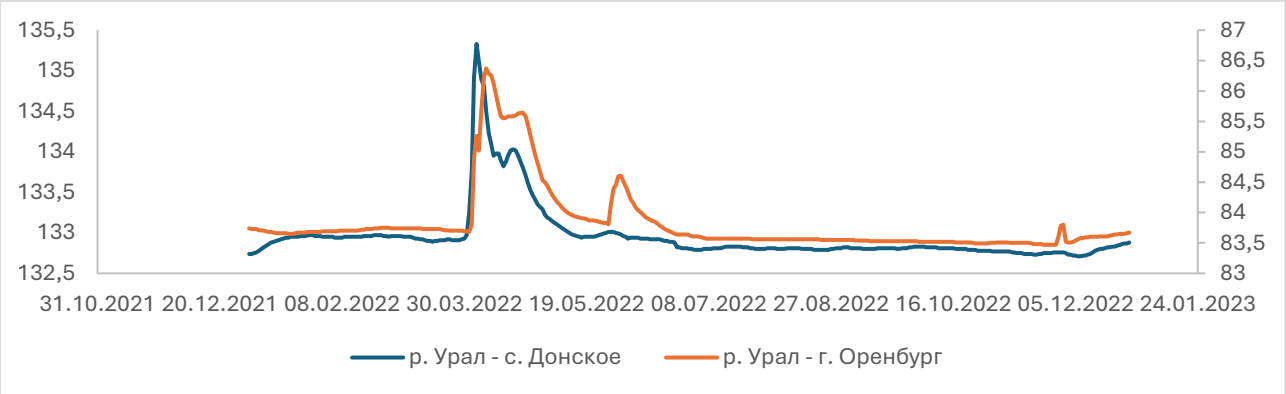
Приложение 21. Совмещённый график уровней воды за 2022 год. р. Урал - с. Уральск - р. Урал - г. Орск



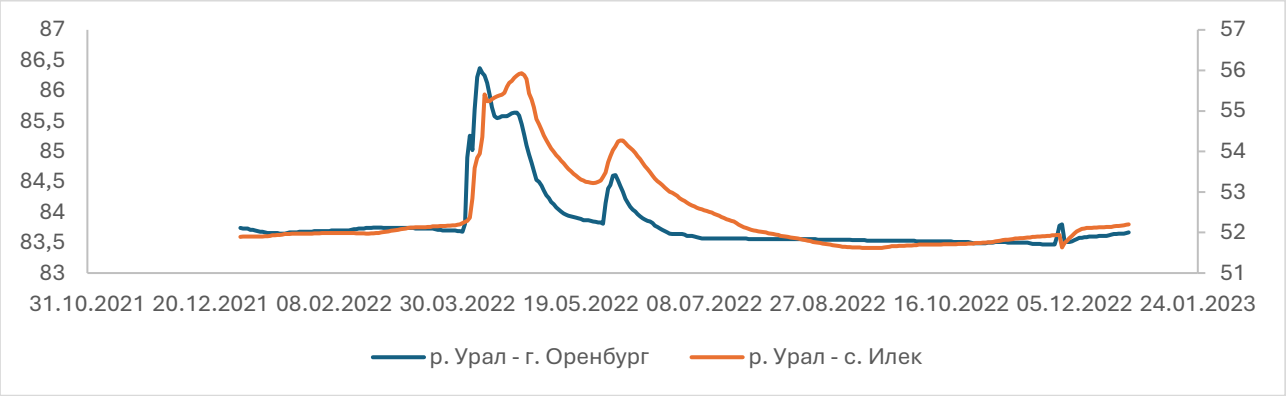
Приложение 22. Совмещённый график уровней воды за 2022 год. Урал - г. Орск - р. Урал - с. Донское



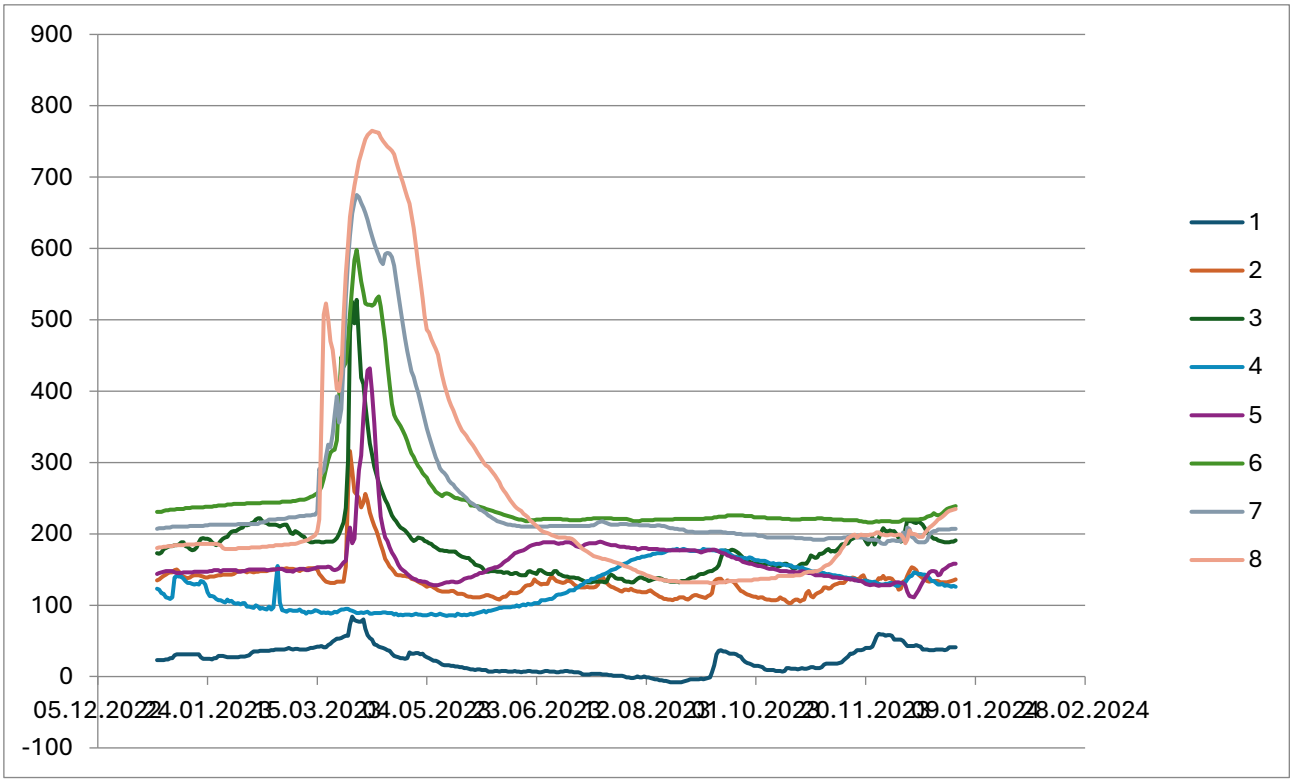
Приложение 23. Совмещённый график уровней воды за 2022 год. р. Урал - с. Донское - р. Урал - г. Оренбург



Приложение 24. Совмещённый график уровней воды за 2022 год. р. Урал - г. Оренбург - р. Урал - с. Илек



Приложение 25. Совмещённый график уровней воды для всех выбранных постов за 2023 год.



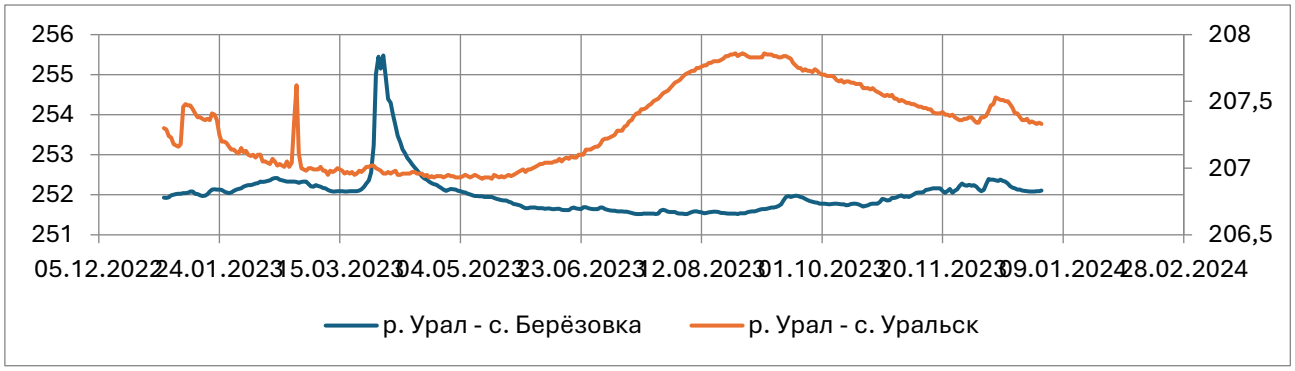
Приложение 26. Совмещённый график уровней воды за 2023 год. р. Урал - г. Верхнеуральское - р. Урал - с. Кизильское



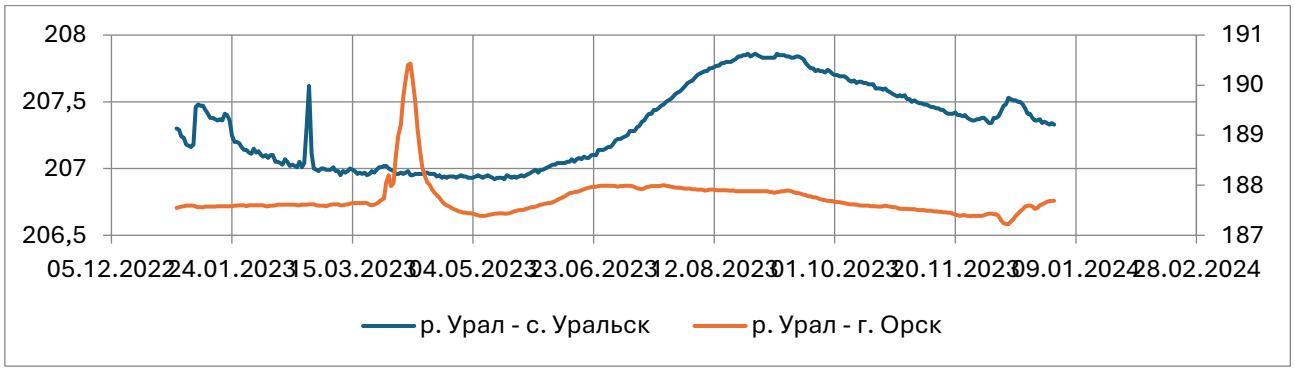
Приложение 27. Совмещённый график уровней воды за 2023 год. р. Урал - с. Кизильское - р. Урал - с. Берёзовка



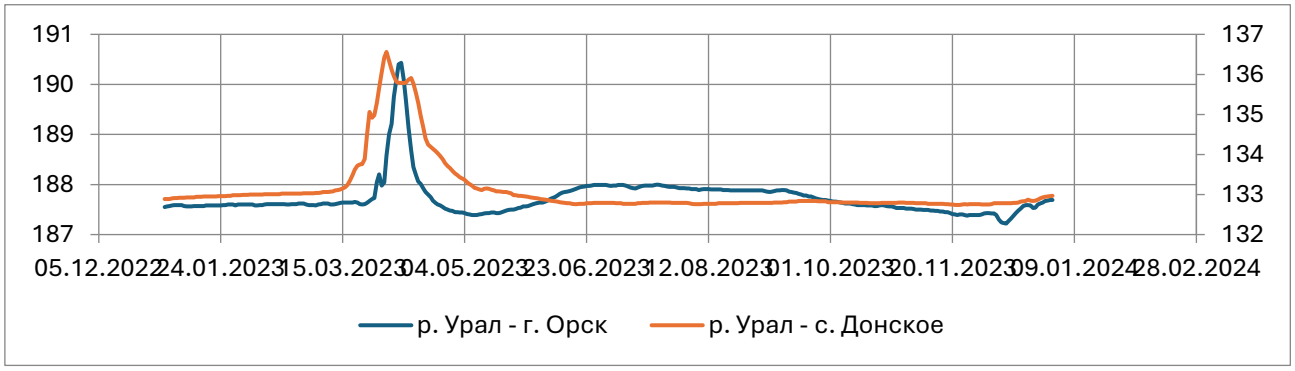
Приложение 28. Совмещённый график уровней воды за 2023 год. р. Урал - с. Берёзовка - р. Урал - с. Уральск



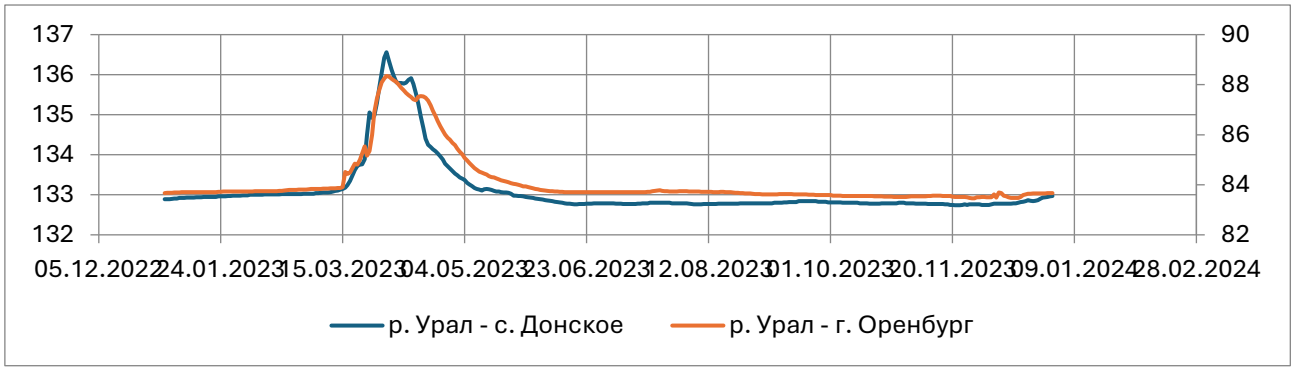
Приложение 29. Совмещённый график уровней воды за 2023 год. р. Урал - с. Уральск - р. Урал - г. Орск



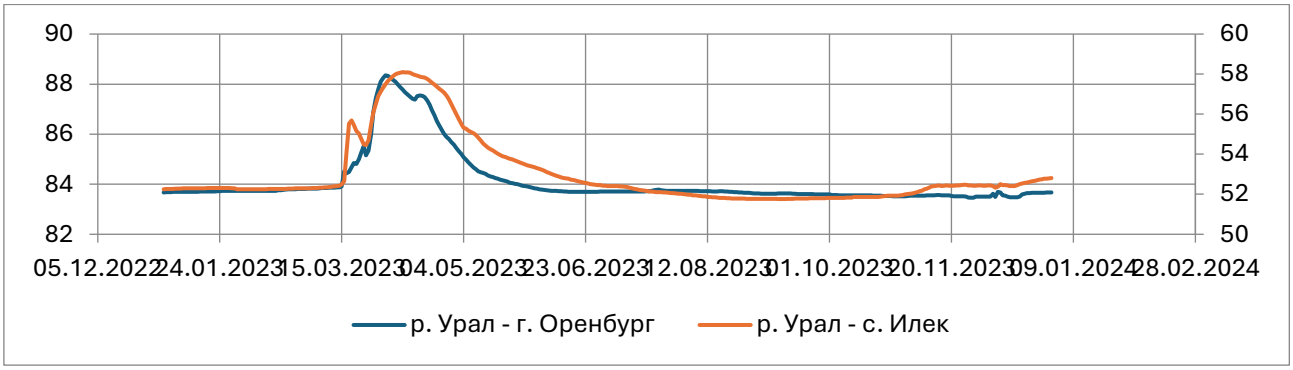
Приложение 30. Совмещённый график уровней воды за 2023 год. Урал - г. Орск - р. Урал - с. Донское



Приложение 31. Совмещённый график уровней воды за 2023 год. р. Урал - с. Донское - р. Урал - г. Оренбург



Приложение 32. Совмещённый график уровней воды за 2023 год. р. Урал - г. Оренбург - р. Урал - с. Илек



Приложение 33. Параметризация модели руслового стока на участке р. Урал - г. Оренбург - р. Урал - с. Илек.

		р. Урал - г. Оренбург - р. Урал - г. Илек								
		3	4	5	6	7	8	9	10	11
20	a	1,03	0,03	0,79	0,56	0,43	0,00	0,00	0,21	-0,37
	q	-0,02	0,07	-0,07	-0,03	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
	S/σ	0,34	1,04	0,09	0,09	0,08	0,79	0,53	0,29	0,46
21	a	0,94	-0,02	0,34	0,48	-0,23	-0,28	0,00	0,16	0,73
	q	-0,01	-0,03	-0,05	-0,03	-0,01	-0,01	0,00	0,00	-0,01
	S/σ	0,81	0,72	0,11	0,07	0,90	0,32	1,00	0,98	1,01
22	a	2,51	-4,30	1,66	0,90	0,53	0,38	0,00	-0,32	0,39
	q	-0,10	-0,70	-0,06	-0,07	-0,03	-0,01	0,00	0,00	0,00
	S/σ	0,34	3,13	1,01	0,06	0,09	0,07	1,00	0,12	1,00
23	a	-0,02	0,02	0,57	0,64	0,05	0,34	0,10	0,76	0,07
	q	0,25	-0,12	-0,06	-0,03	-0,01	-0,01	0,00	-0,01	0,00
	S/σ	0,65	0,24	0,07	0,20	0,13	0,38	0,30	0,14	1,03
23 Расч	a	1,49	-1,43	0,93	0,65	0,25	0,04	0,00	0,01	0,25
	q	-0,04	-0,22	-0,06	-0,04	-0,02	-0,01	0,00	0,00	0,00
	S/σ	2,52	0,58	0,70	1,18	0,43	2,25	0,69	1,39	1,27

Приложение 34. Параметризация модели руслового стока на участке р. Урал - г. Орск - р. Урал - с. Донское.

		р. Урал - с. Орск - р. Урал - с. Донское								
		3	4	5	6	7	8	9	10	11
20	a	0,6	0,001	0,1	0,0004	0,2	0,008	0,3	0,0038	0,2
	q	-0,03	-0,010	-0,01	0,0010	0,002	0,003	-0,01	-0,0004	-0,001
	S/σ	0,96	0,52	0,46	1,39	0,40	1,43	0,002	0,873472	0,84
21	a	1,0	1,068	0,1	0,3994	0,0114	-0,006	0,2	0,0053	0,0
	q	-0,04	-0,159	-0,01	-0,0038	-0,0004	0,00047	-0,01	0,0000	0,006
	S/σ	0,43	0,17	0,46	0,28	1,02	1,09	0,33	1,01	1,37
22	a	1,0	0,247	-0,003	0,3309	0,0677	-0,009	0,0076	0,0675	0,013
	q	-0,02	-0,036	-0,001	-0,0125	-0,0012	0,00000	0,0003	-0,0023	0,000
	S/σ	0,76	0,44	1,04	0,46	0,73	1,03	0,96	0,25	1,01
23	a	0,0	1,226	0,2	-0,0100	-0,0097	0,006	-0,0050	0,0675	0,218
	q	0,11	-0,179	-0,01	0,0000	-0,0004	0,00120	-0,0004	-0,0023	-0,003
	S/σ	0,54	0,29	0,10	0,91	1,09	0,53	0,89	0,25	0,64
23 Расч	a	0,88	0,44	0,05	0,24	0,10	0,00	0,18	0,03	0,07
	q	-0,03	-0,07	0,00	-0,01	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00
	S/σ	1,79	1,53	1,29	2,90	1,67	0,58	7,32	1,24	3,14

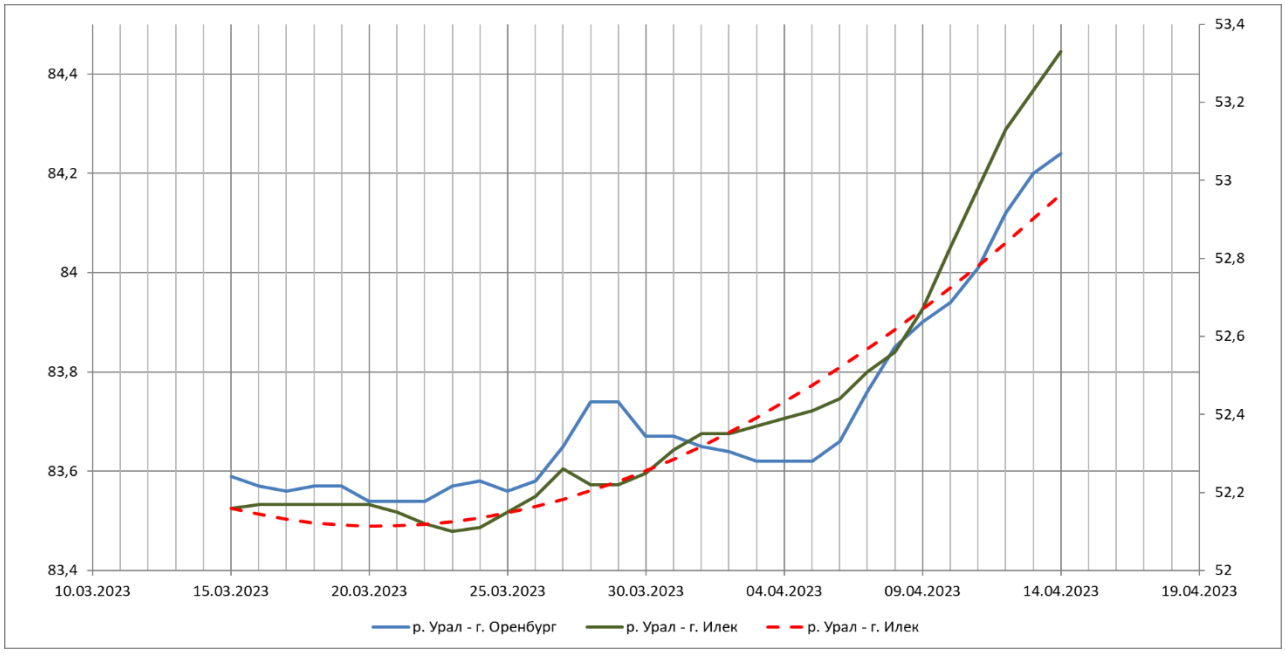
Приложение 35. Параметризация модели руслового стока на участке р. Урал - с. Донское - р. Урал - г. Оренбург.

		р. Урал - с. Донское - р. Урал - г. Оренбург								
		3	4	5	6	7	8	9	10	11
20	a	0,7	0,007	0,7	0,1	0,3	-0,002	0,3	0,1	0,003
	q	0,0	0,047	-0,048	-0,005	-0,037	0,005	-0,01	-0,02	0,006
	S/σ	0,38	1,36	0,22	0,37	0,61	1,15	0,15	0,57	1,00
21	a	1,1	0,0	0,7	0,3	0,003	-0,005	0,2	0,005	-0,2
	q	-0,02	-0,1	-0,04	-0,004	0,003	0,0017	-0,01	0,002	0,007
	S/σ	0,62	0,31	0,12	0,89	1,45	2,24	1,02	0,29	1,02
22	a	1,8	0,03	0,6	0,5	0,1	-0,018	-0,0348	0,2	0,4
	q	-0,1	-0,06	-0,01	-0,02	-0,001	-0,001	-0,0004	0,002	0,006
	S/σ	0,45	0,39	1,13	0,21	0,58	0,43	0,63	0,91	0,98
23	a	96,9	20,0	57,3	28,1	75,0	3,0	2,4	5,0	9,3
	q	33,1	-1,4	0,0	-1,1	-2,3	-0,4	-0,4	-0,4	-1,1
	S/σ	0,30	0,06	0,61	0,83	0,72	0,39	0,25	0,57	1,06
23 Расч	a	1,21	0,02	0,65	0,30	0,15	-0,01	0,13	0,09	0,08
	q	-0,03	-0,03	-0,03	-0,01	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00
	S/σ	2,17	1,97	2,32	1,29	1,71	1,87	2,24	1,33	1,31

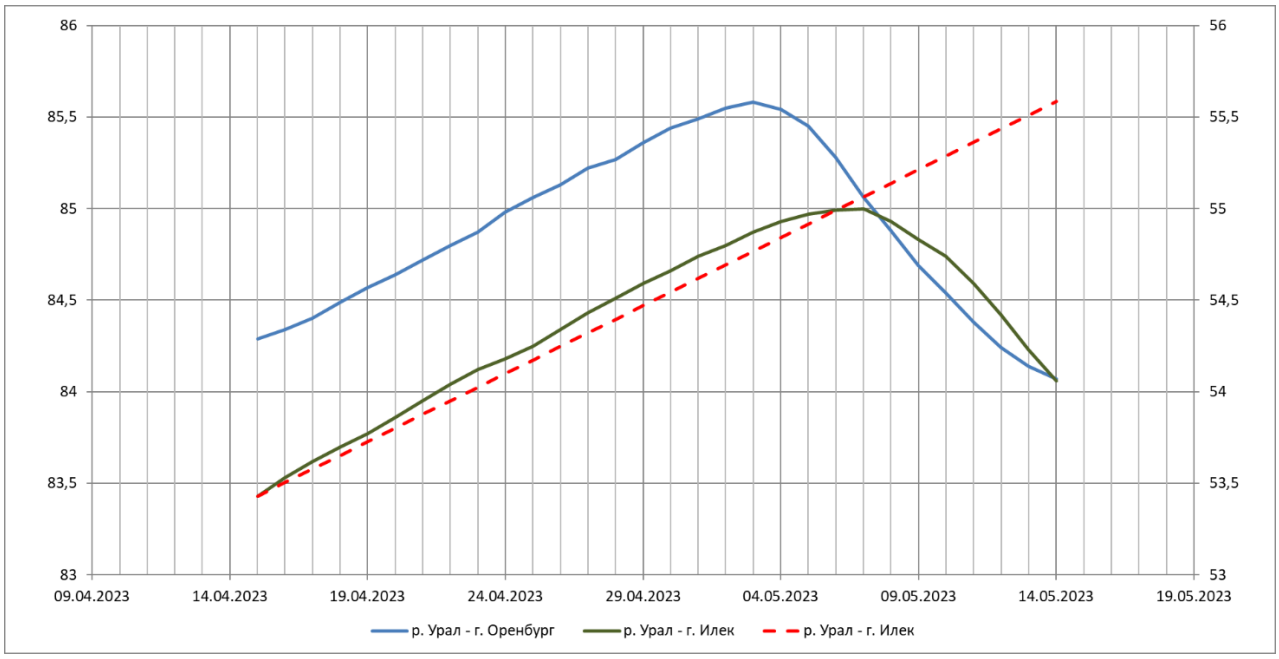
Приложение 36. Параметризация модели руслового стока на участке р. Урал - с. Уральск - р. Урал - г. Орск.

		р. Урал - с. Уральск - р. Урал - г. Орск								
		3	4	5	6	7	8	9	10	11
20	a	0,3	0,1	3,9	0,0	0,0013	0,0	0,0	0,002	0,3
	q	0,0	0,0	-0,9	0,0	0,0070	0,0	0,0	-0,004	0,0
	S/σ	1,00	0,78	1,00	0,68	0,68	0,22	0,19	0,16	0,40
21	a	3,9	0,5	0,0	0,0	0,0464	0,0	0,1	0,062	0,1
	q	-0,9	-0,1	0,0	0,0	-0,0023	0,0	0,0	-0,005	0,0
	S/σ	1,68	0,61	0,15	0,58	1,01	0,48	0,10	0,17	1,0
22	a	0,4	0,2	0,0	0,2	-0,0002	0,0	0,0	0,062	0,2
	q	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,0034	0,0	0,0	-0,005	0,0
	S/σ	1,0	0,09	1,0	0,54	0,49	0,49	0,38	0,60	1,0
23	a	0,5	0,5	3,9	0,0	0,0077	0,1	0,0	0,062	0,1
	q	0,9	-0,1	-0,9	0,0	-0,0019	0,0	0,0	-0,005	0,0
	S/σ	0,76	0,12	1,4	1,47	0,65	0,82	0,23	0,78	0,86
23 Расч	a	1,53	0,26	1,30	0,07	0,02	0,01	0,04	0,04	0,18
	q	-0,33	-0,03	-0,30	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
	S/σ	2,43	1,74	15,33	1,80	1,36	21,31	0,96	0,78	1,35

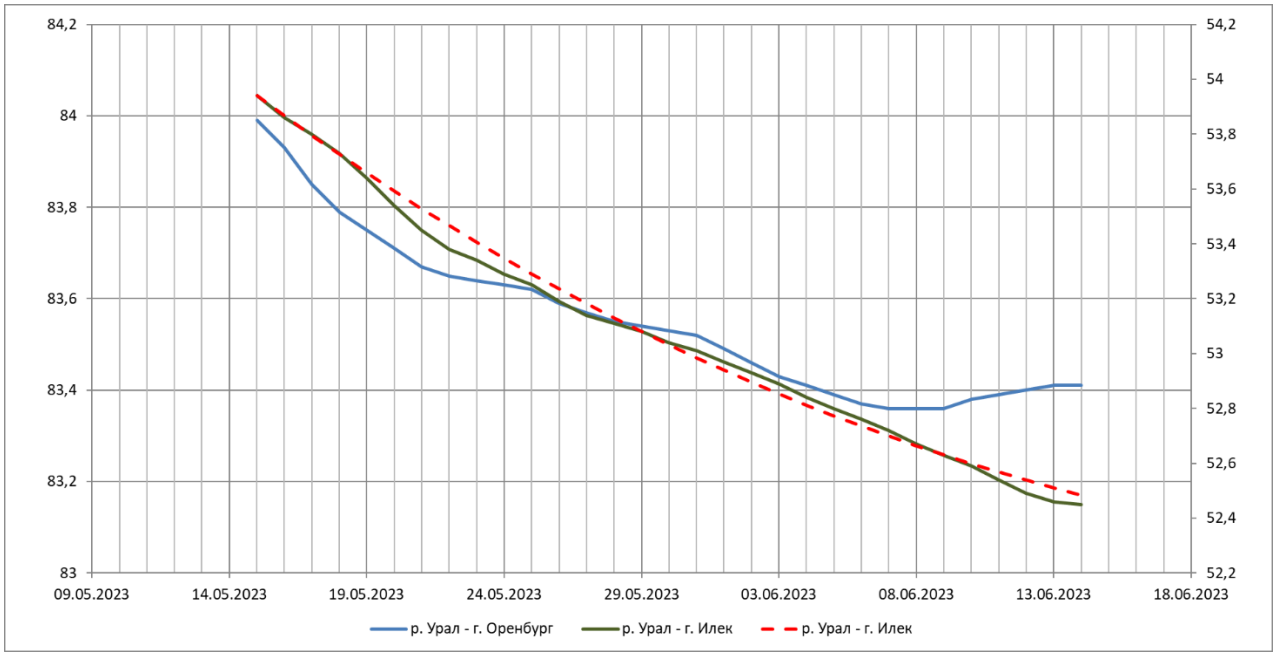
Приложение 37. Прогноз уровня воды за март 2020 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



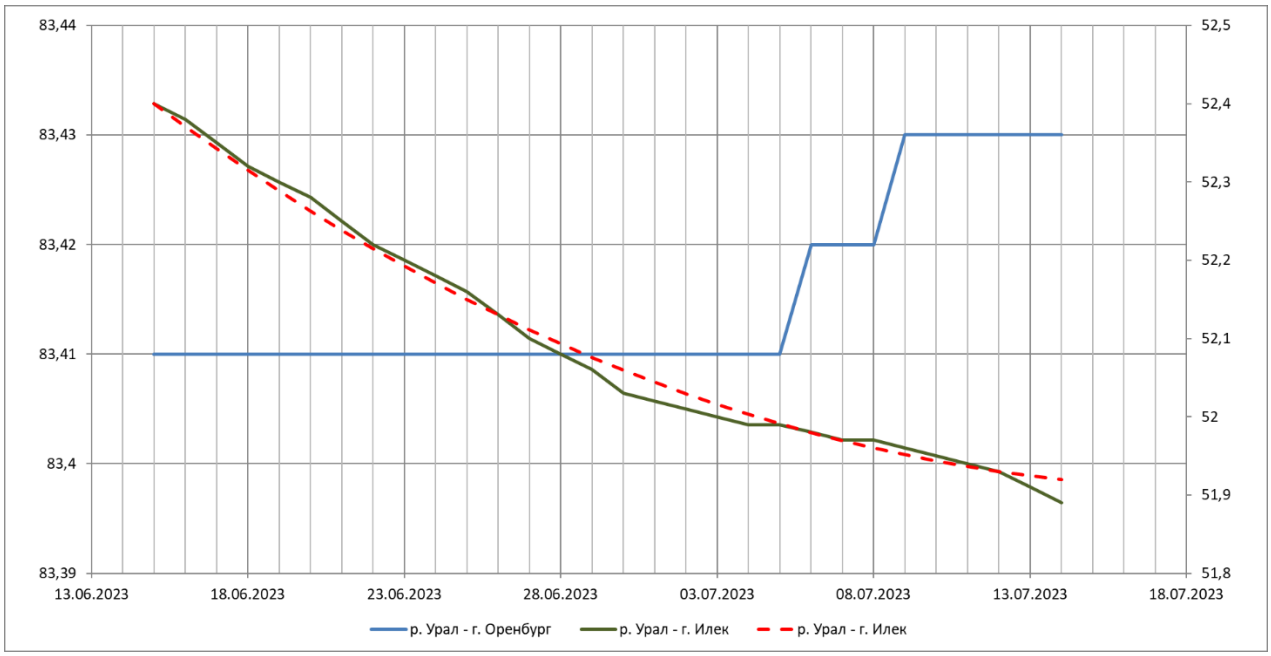
Приложение 38. Прогноз уровня воды за апрель 2020 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



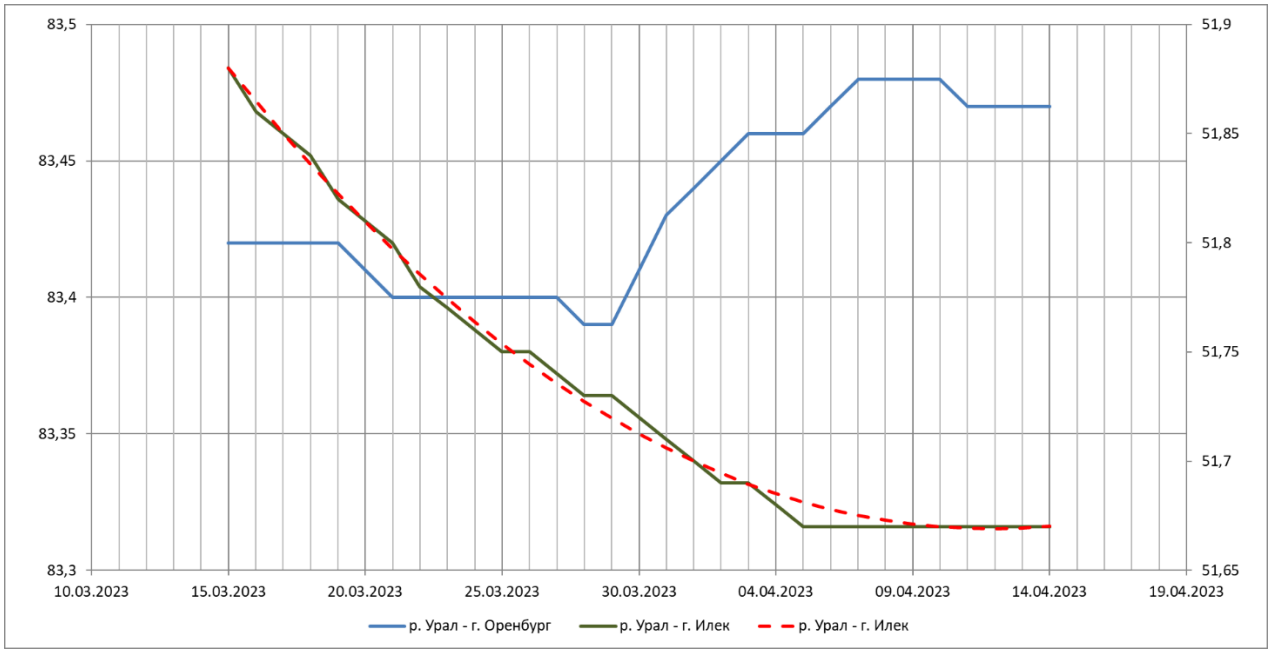
Приложение 39. Прогноз уровня воды за май 2020 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



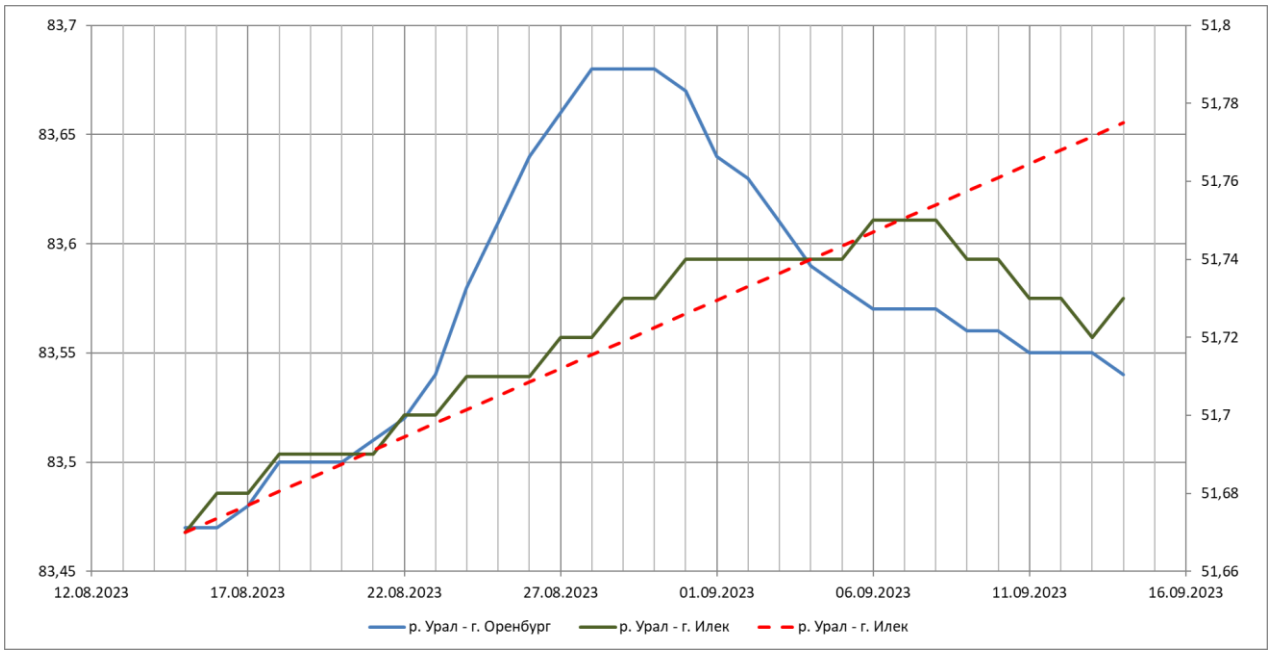
Приложение 40. Прогноз уровня воды за июнь 2020 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



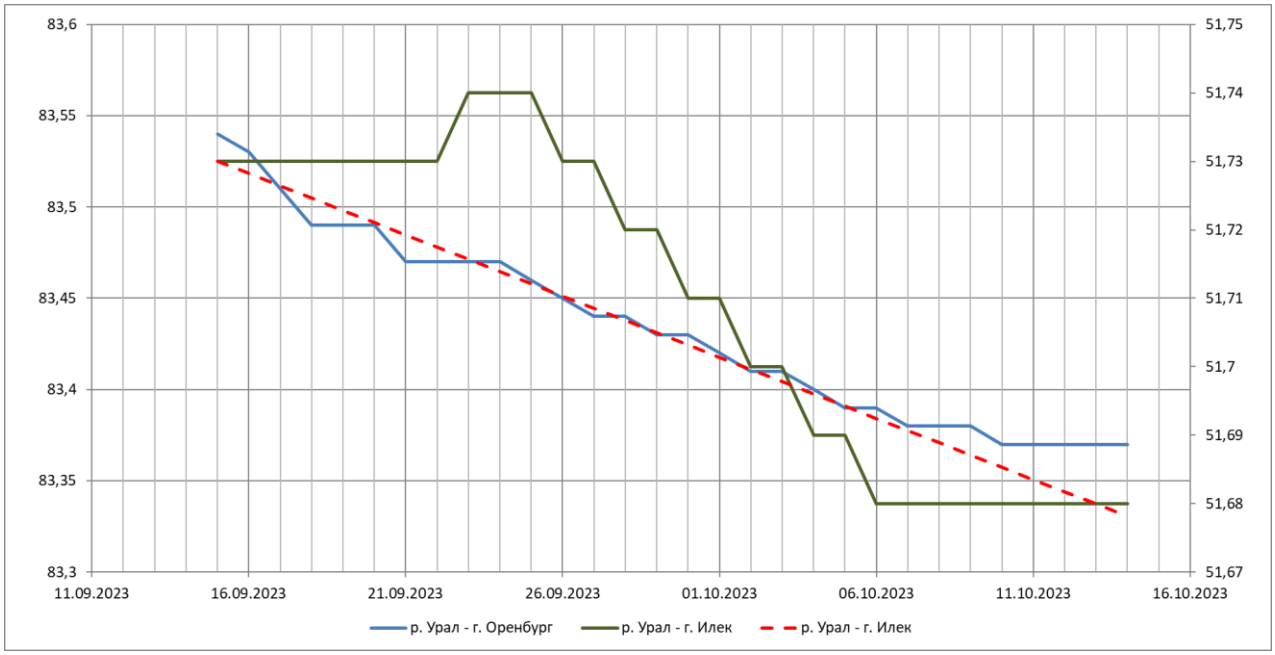
Приложение 41. Прогноз уровня воды за июль 2020 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



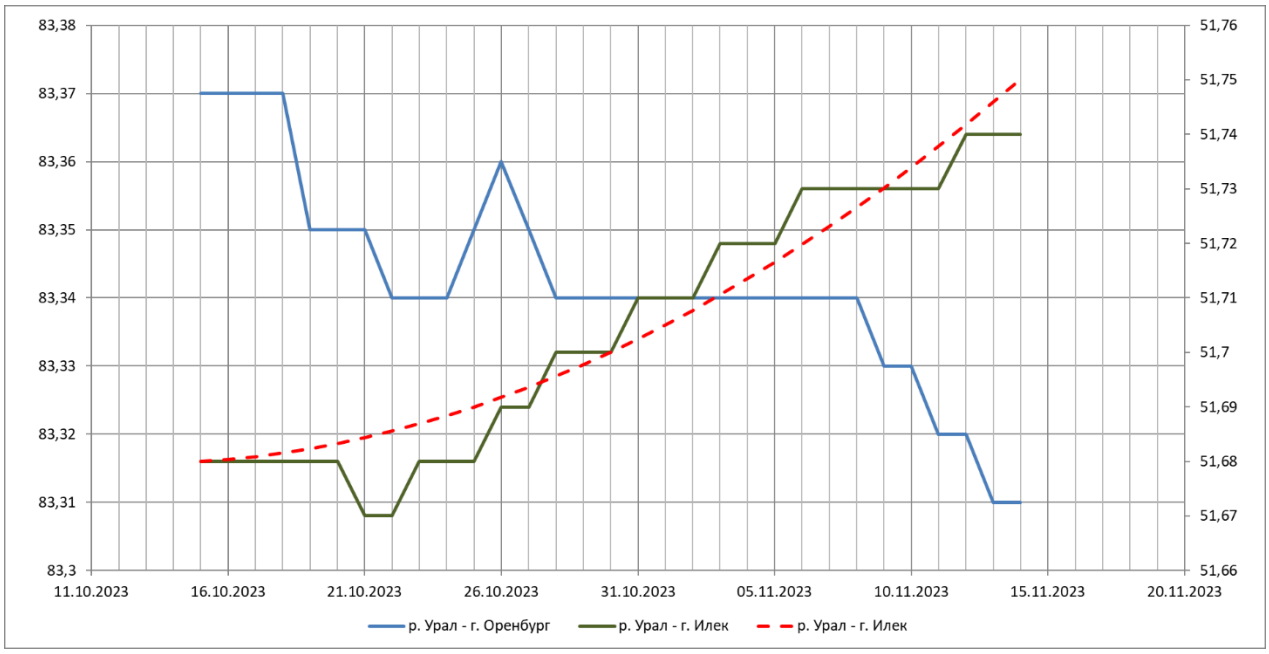
Приложение 42. Прогноз уровня воды за август 2020 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



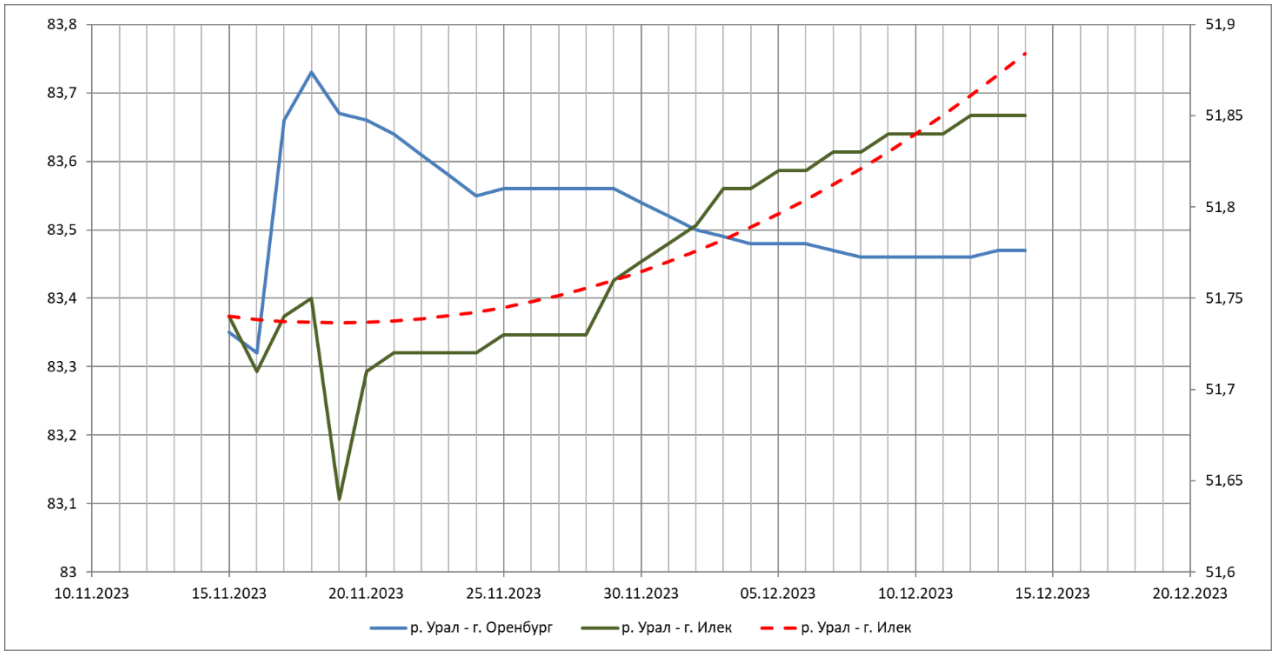
Приложение 43. Прогноз уровня воды за сентябрь 2020 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



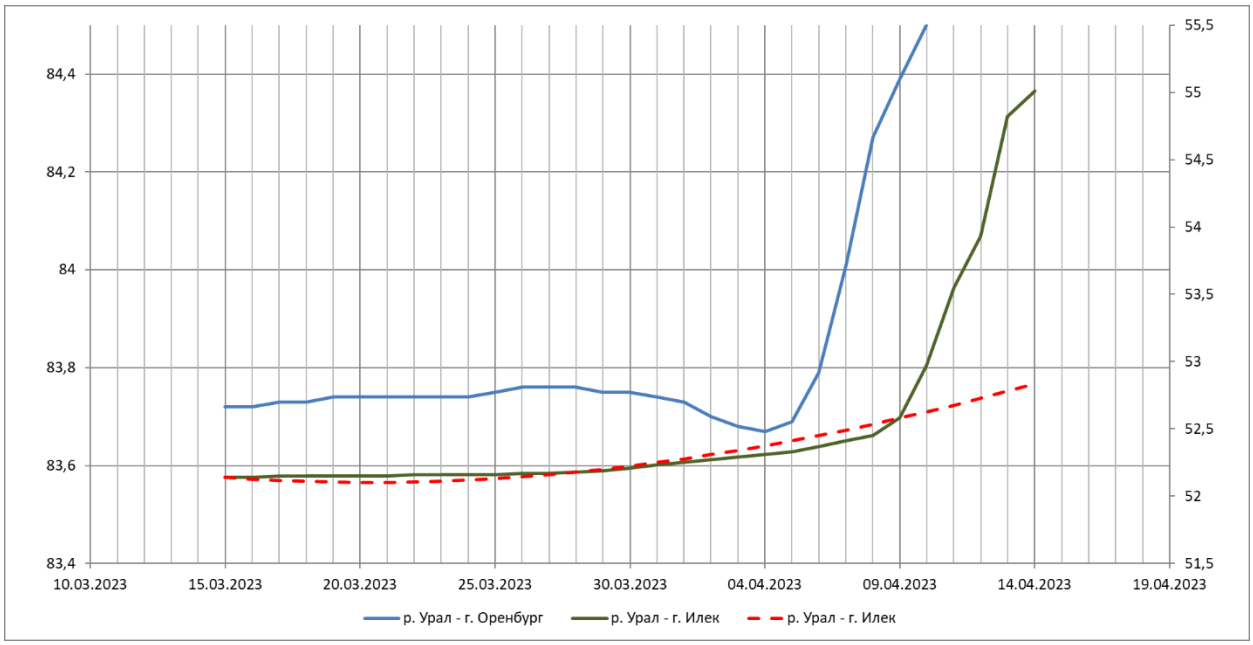
Приложение 44. Прогноз уровня воды за октябрь 2020 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



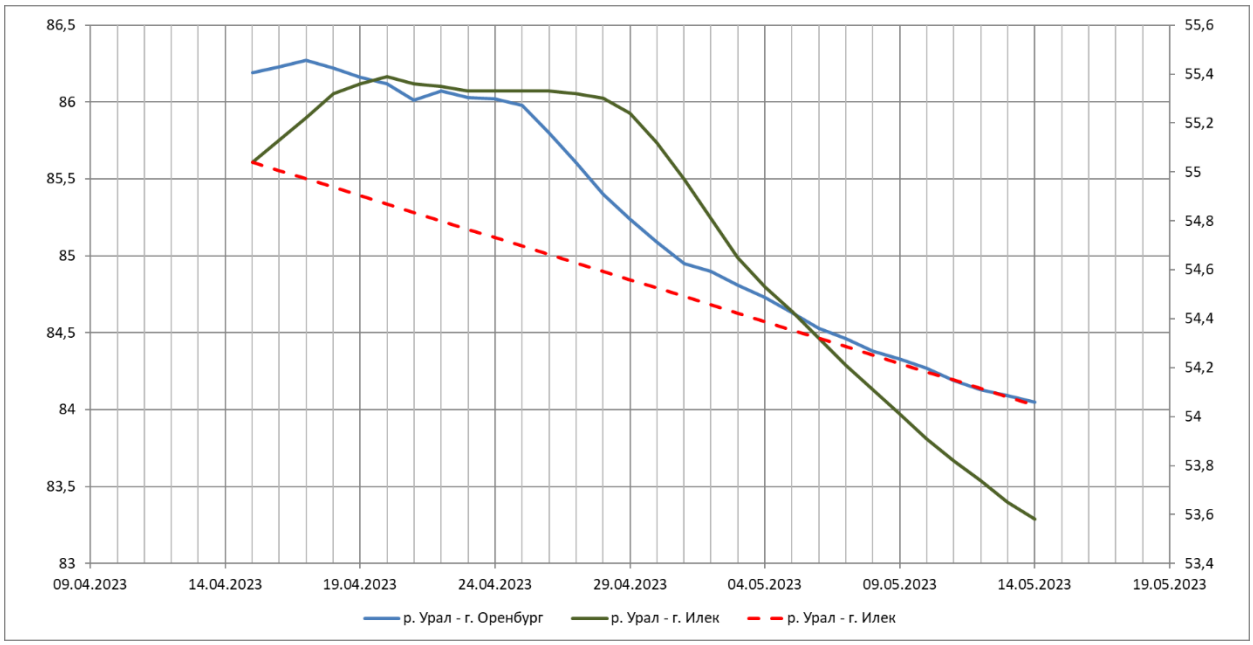
Приложение 45. Прогноз уровня воды за Ноябрь 2020 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



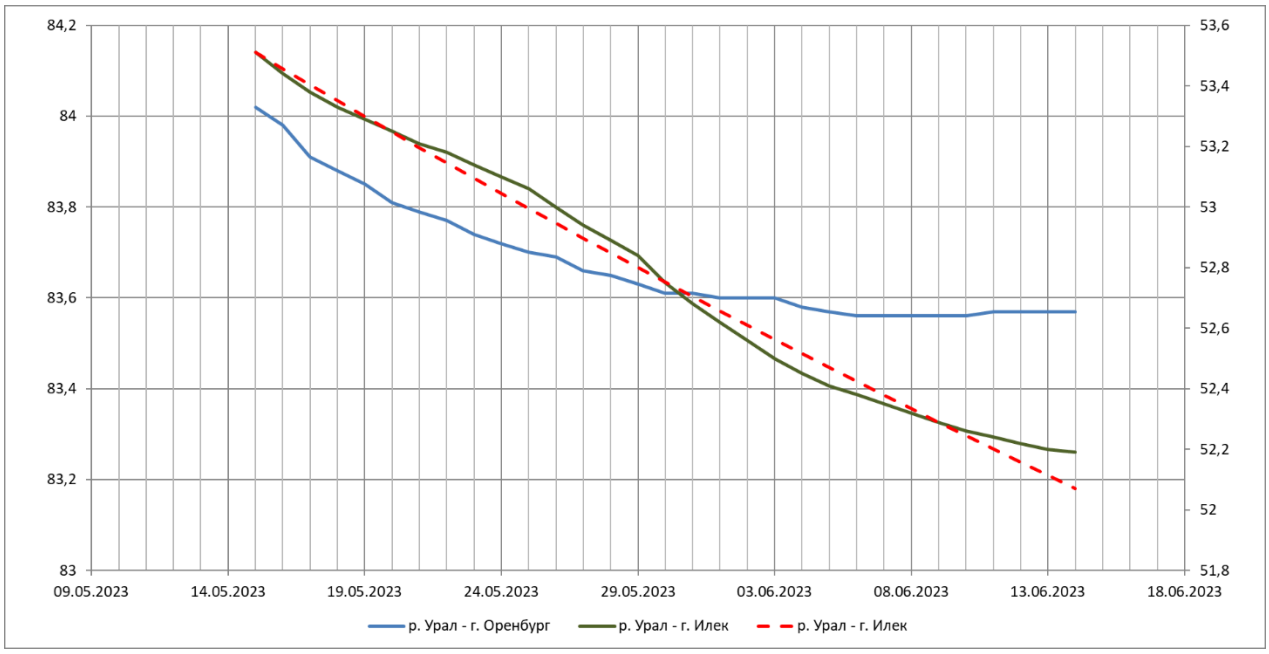
Приложение 46. Прогноз уровня воды за март 2021 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



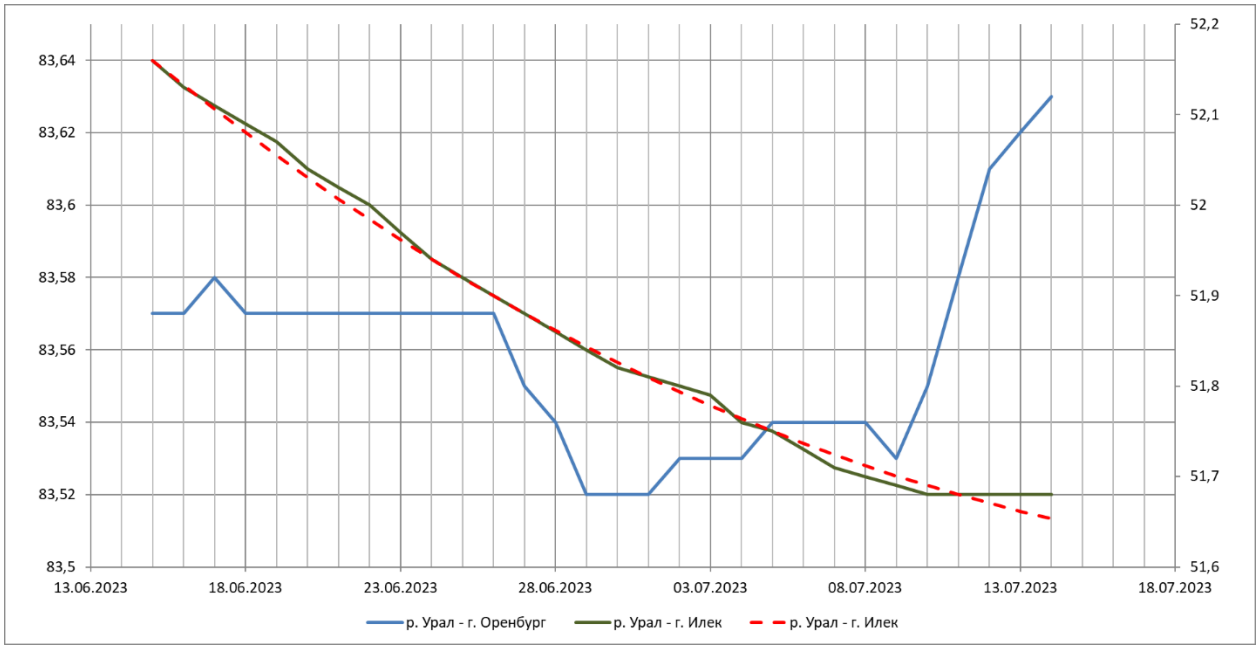
Приложение 47. Прогноз уровня воды за апрель 2021 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



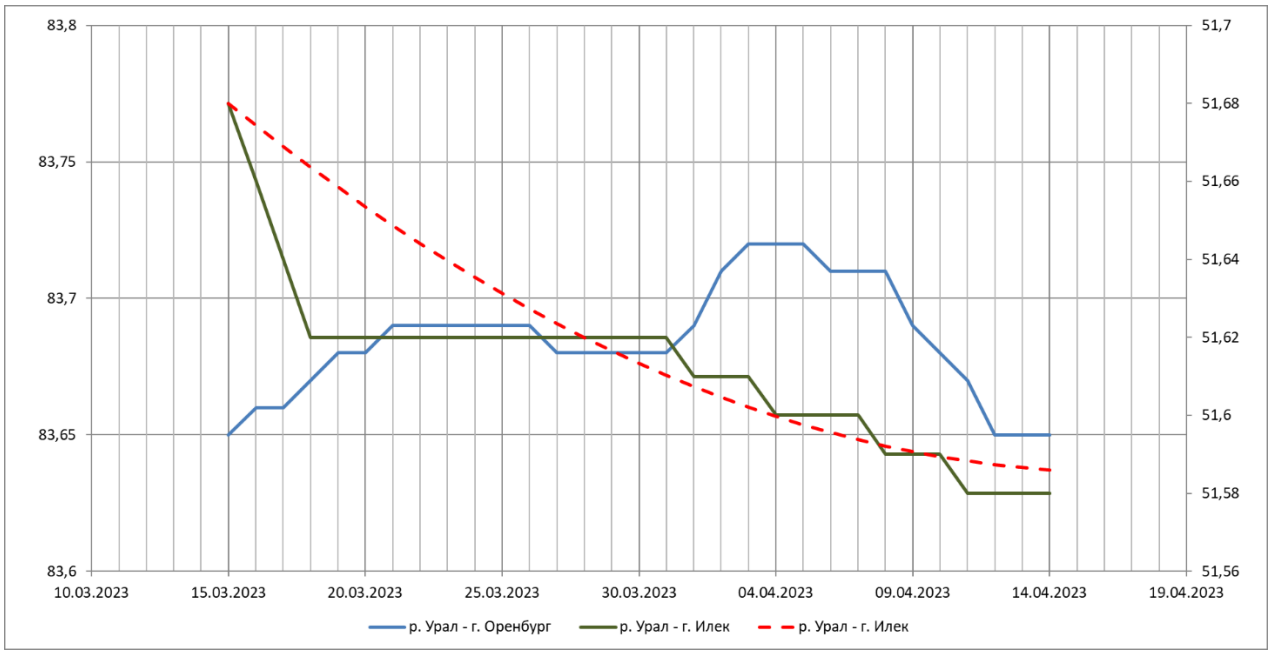
Приложение 48. Прогноз уровня воды за май 2021 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



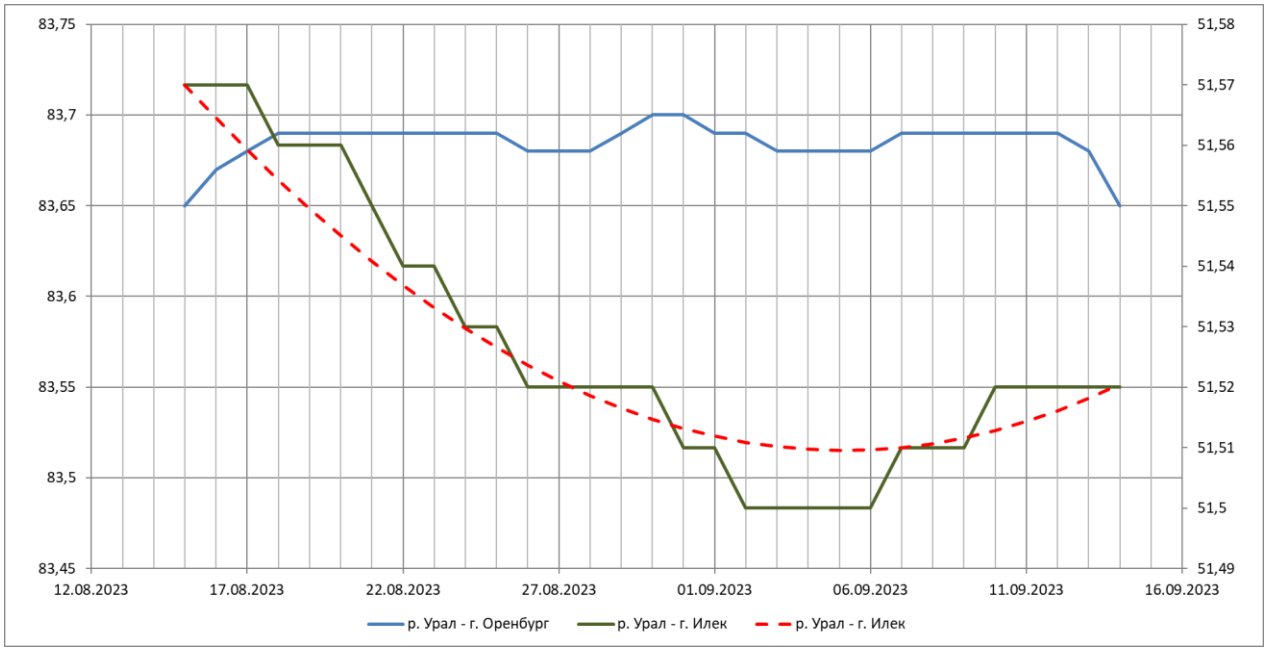
Приложение 49. Прогноз уровня воды за июнь 2021 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



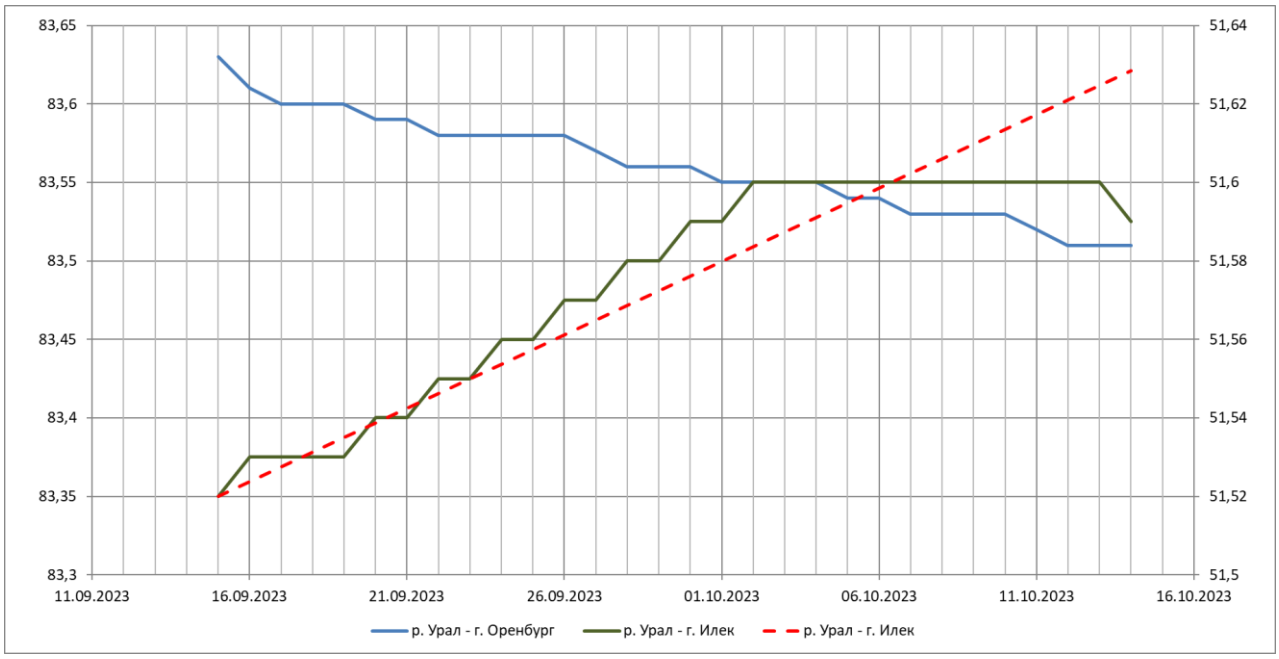
Приложение 50. Прогноз уровня воды за июль 2021 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



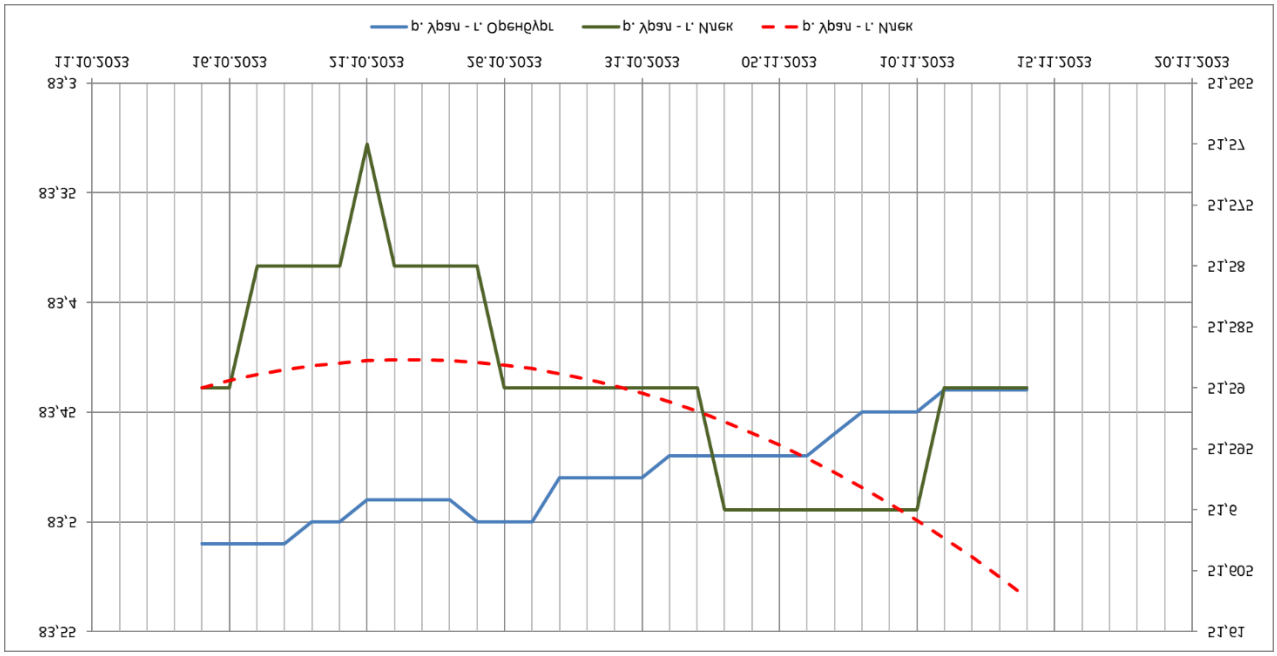
Приложение 51. Прогноз уровня воды за август 2021 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



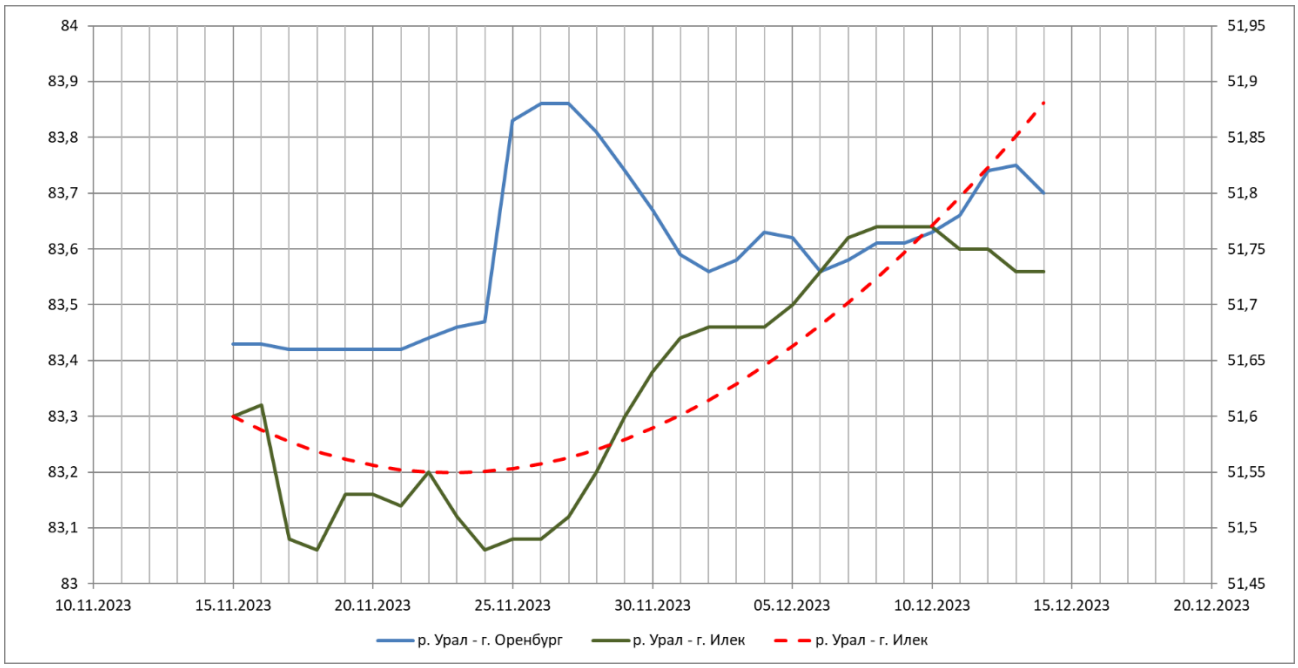
Приложение 52. Прогноз уровня воды за сентябрь 2021 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



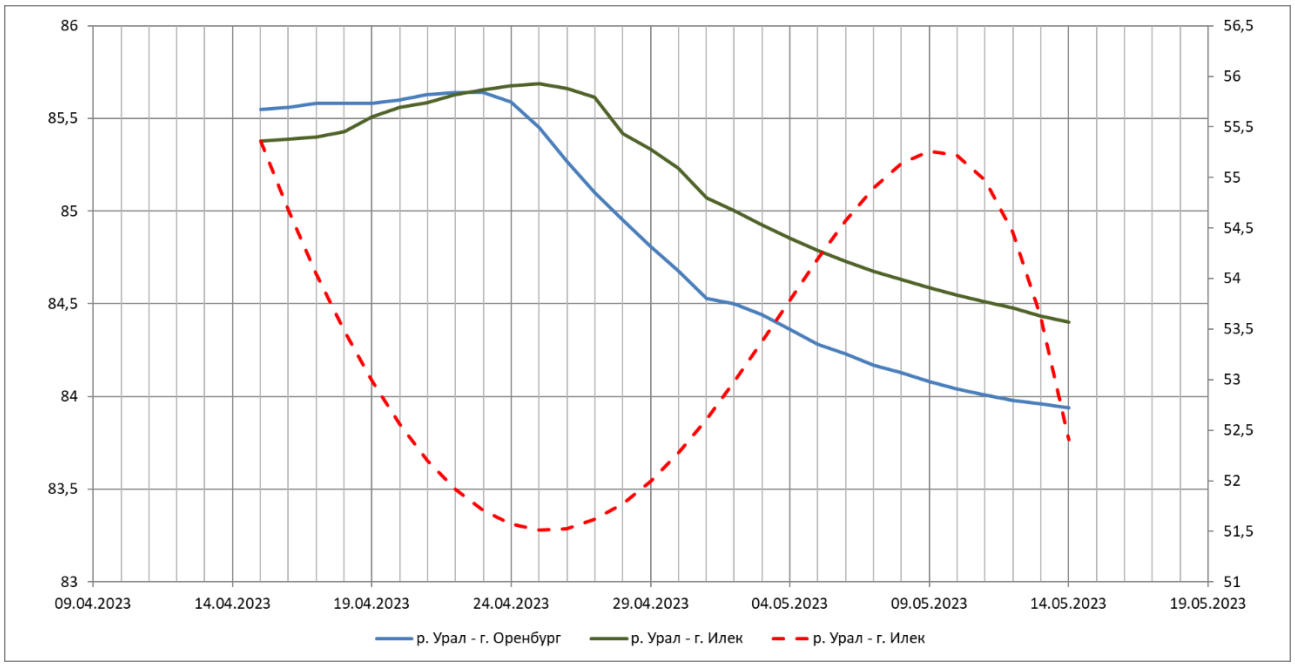
Приложение 53. Прогноз уровня воды за октябрь 2021 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



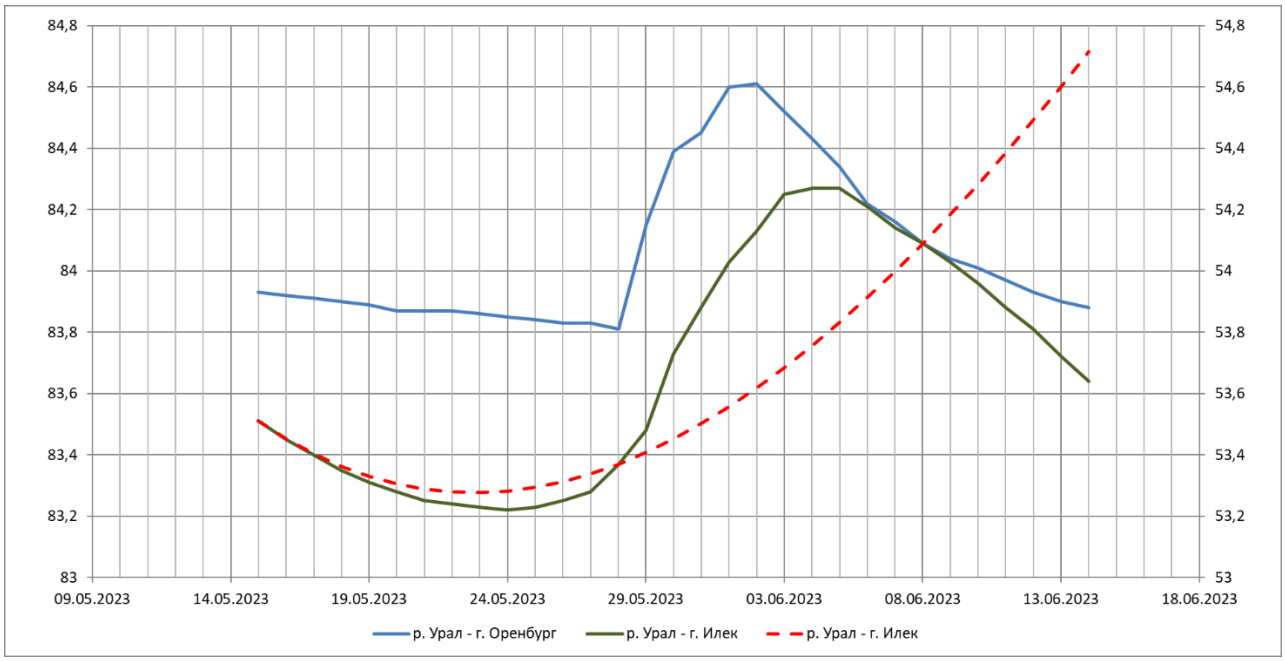
Приложение 55. Прогноз уровня воды за ноябрь 2021 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



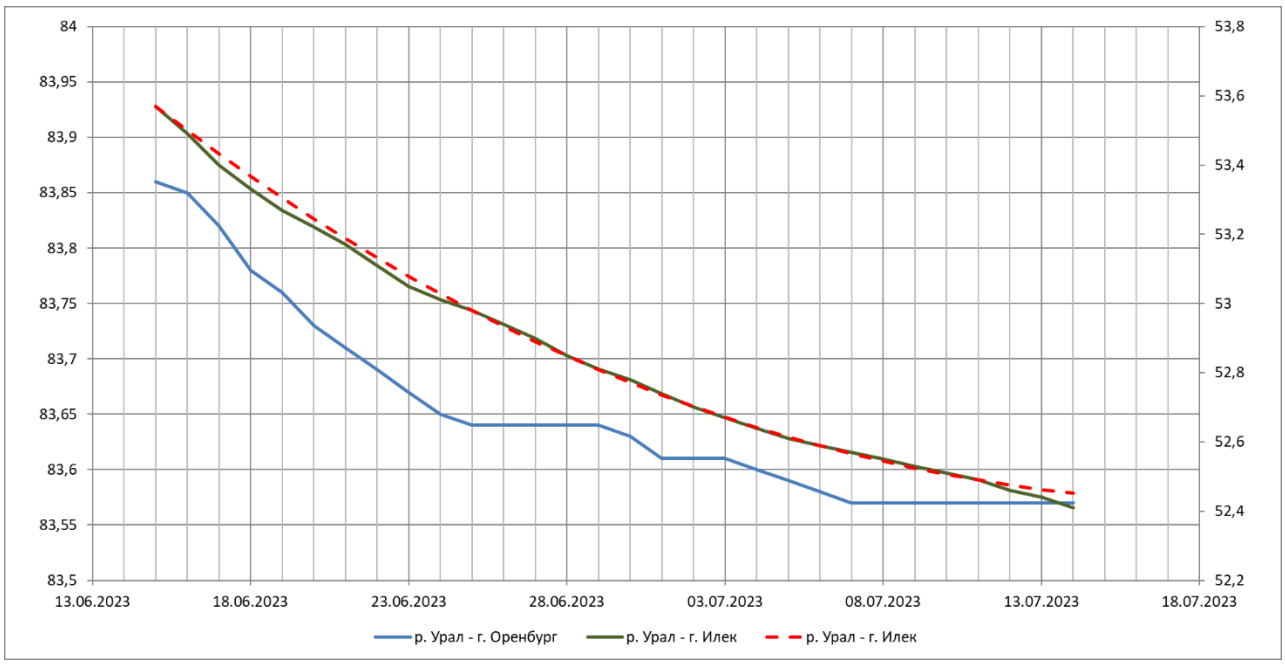
Приложение 56. Прогноз уровня воды за апрель 2022 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



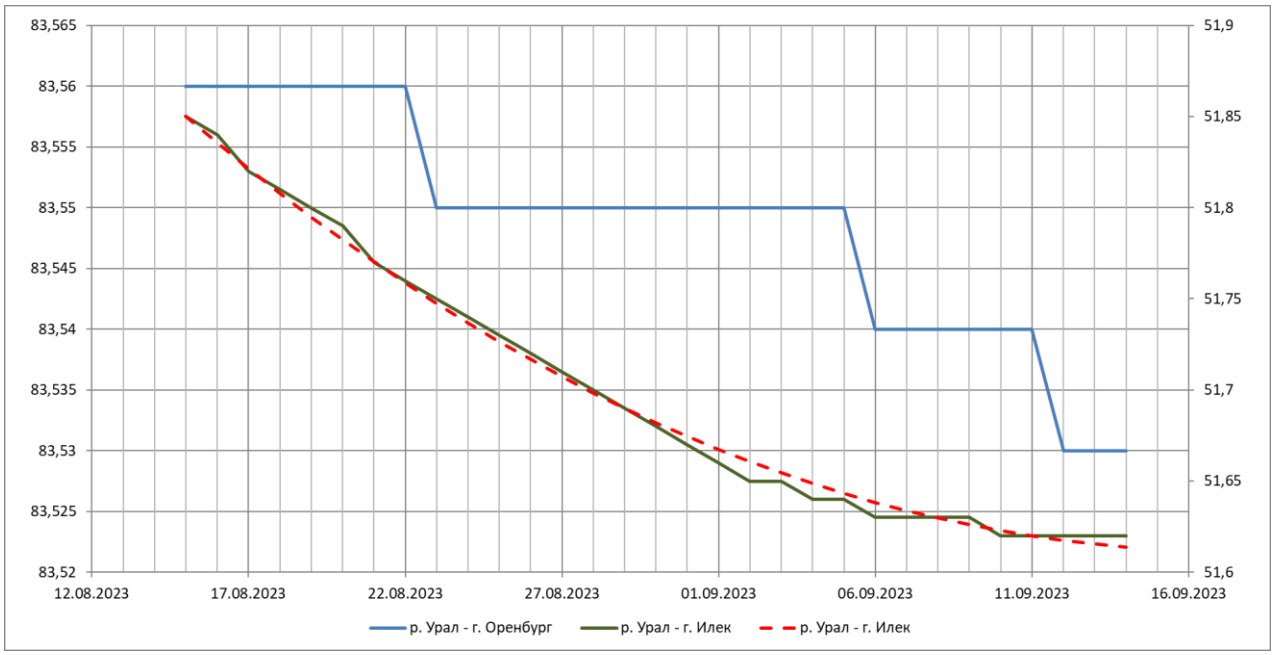
Приложение 57. Прогноз уровня воды за май 2022 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



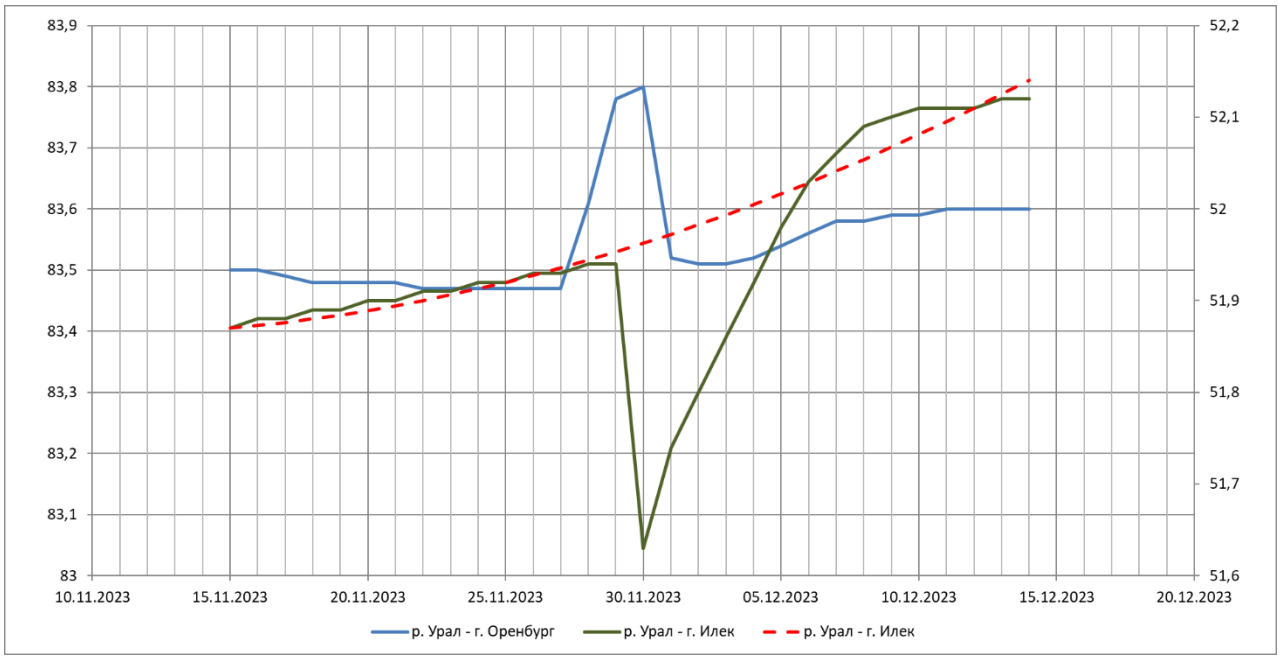
Приложение 58. Прогноз уровня воды за июнь 2022 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



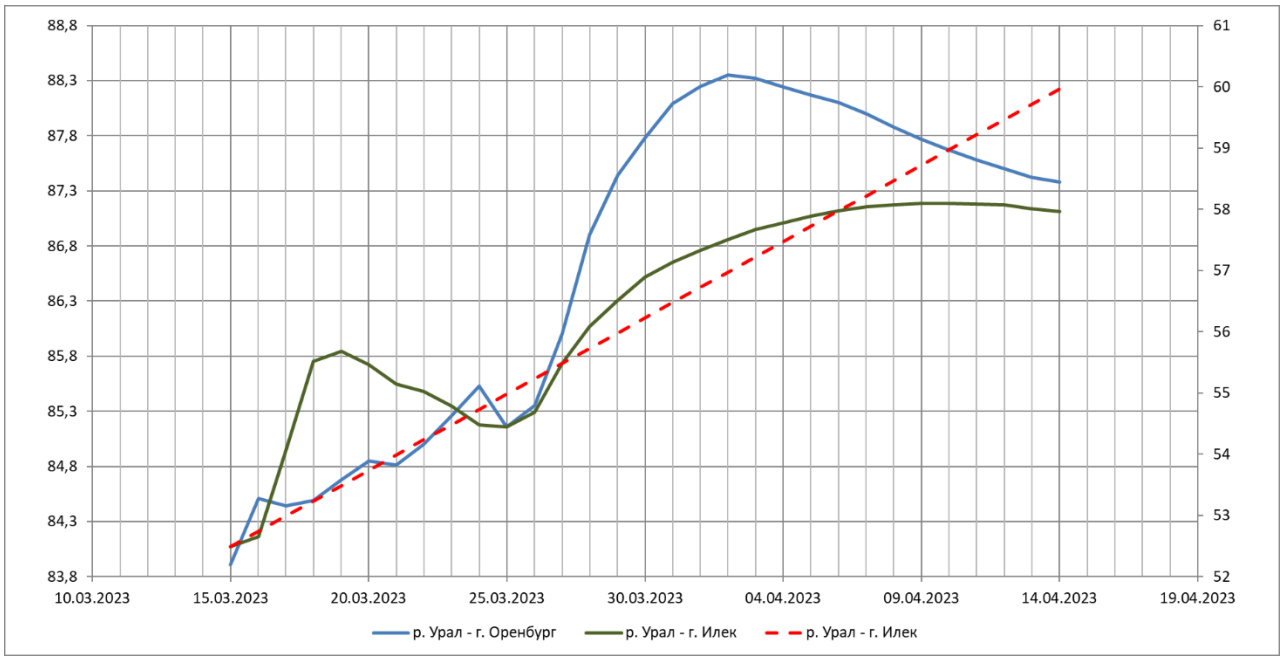
Приложение 59. Прогноз уровня воды за август 2022 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



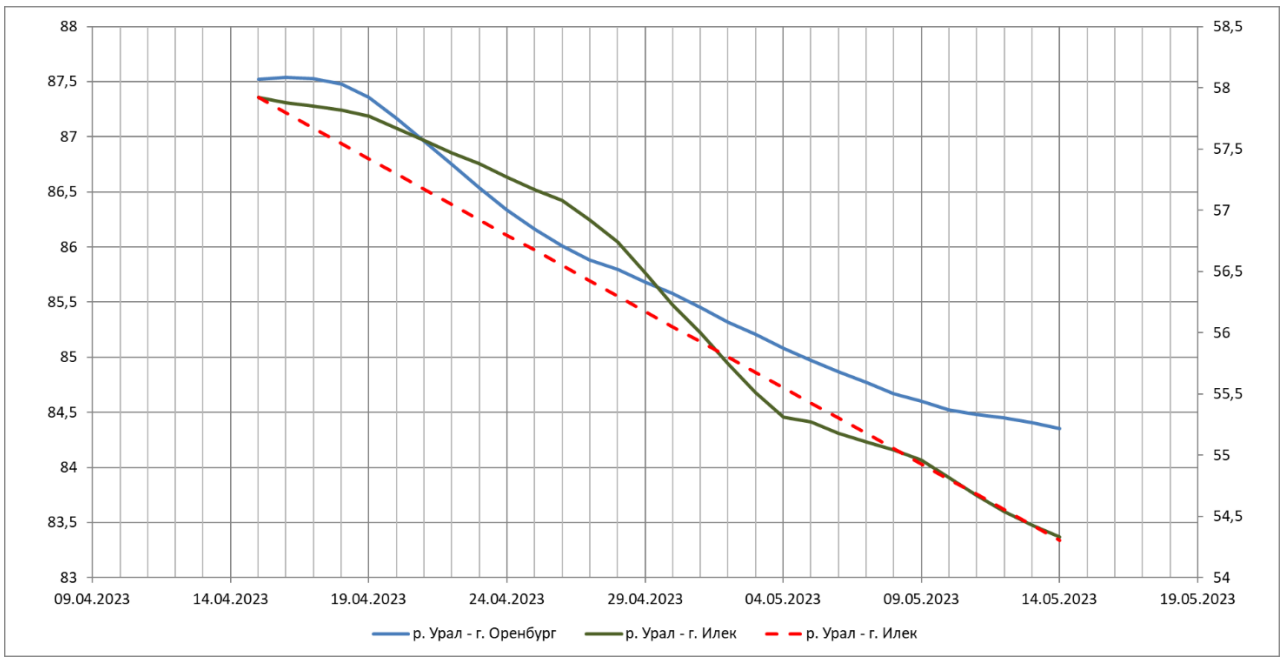
Приложение 60. Прогноз уровня воды за ноябрь 2022 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек



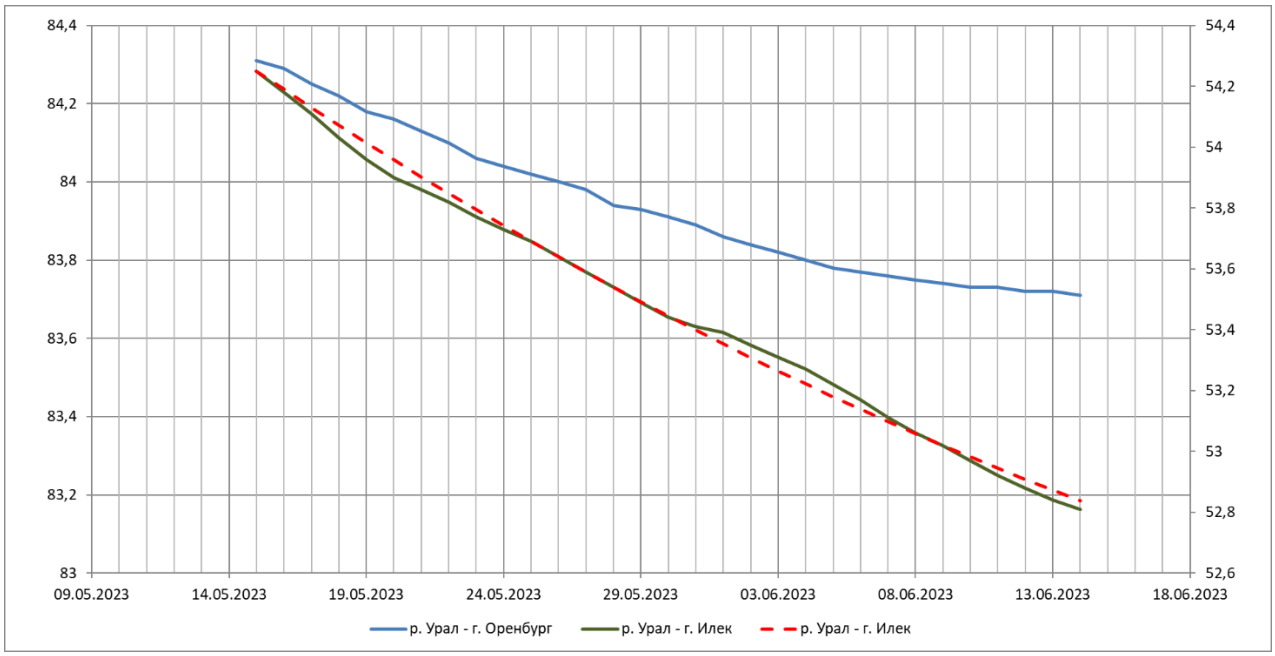
Приложение 61. Прогноз уровня воды за март 2023 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек.



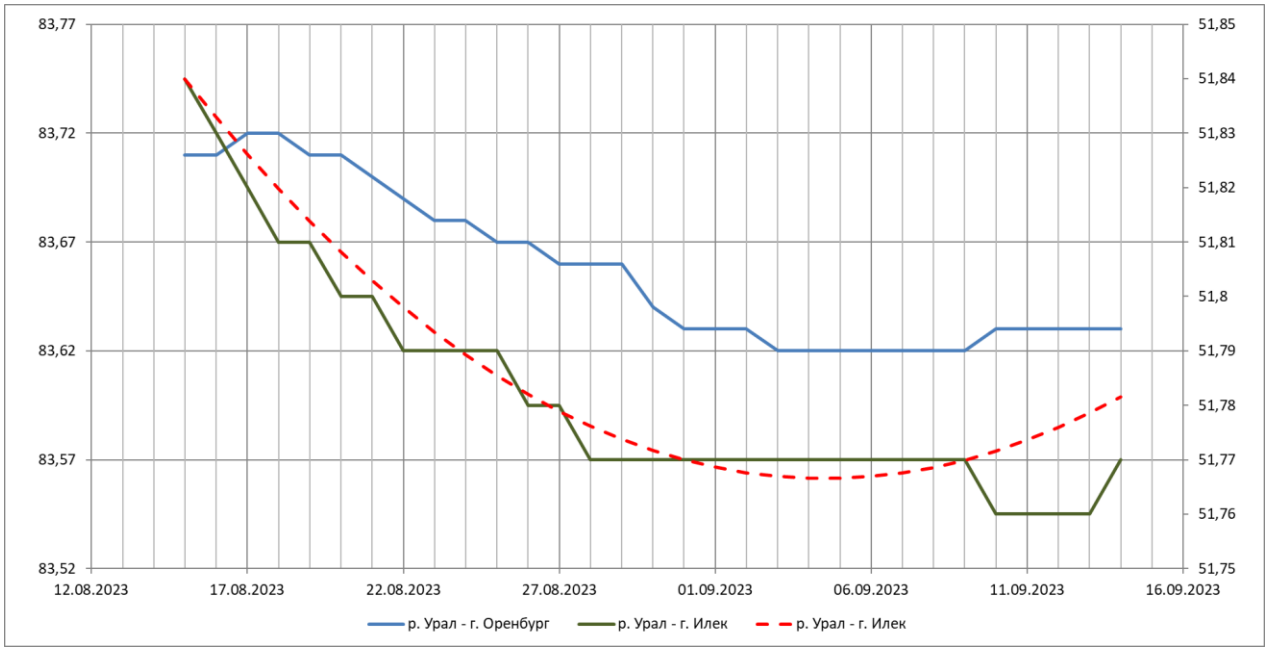
Приложение 62. Прогноз уровня воды за апрель 2023 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек.



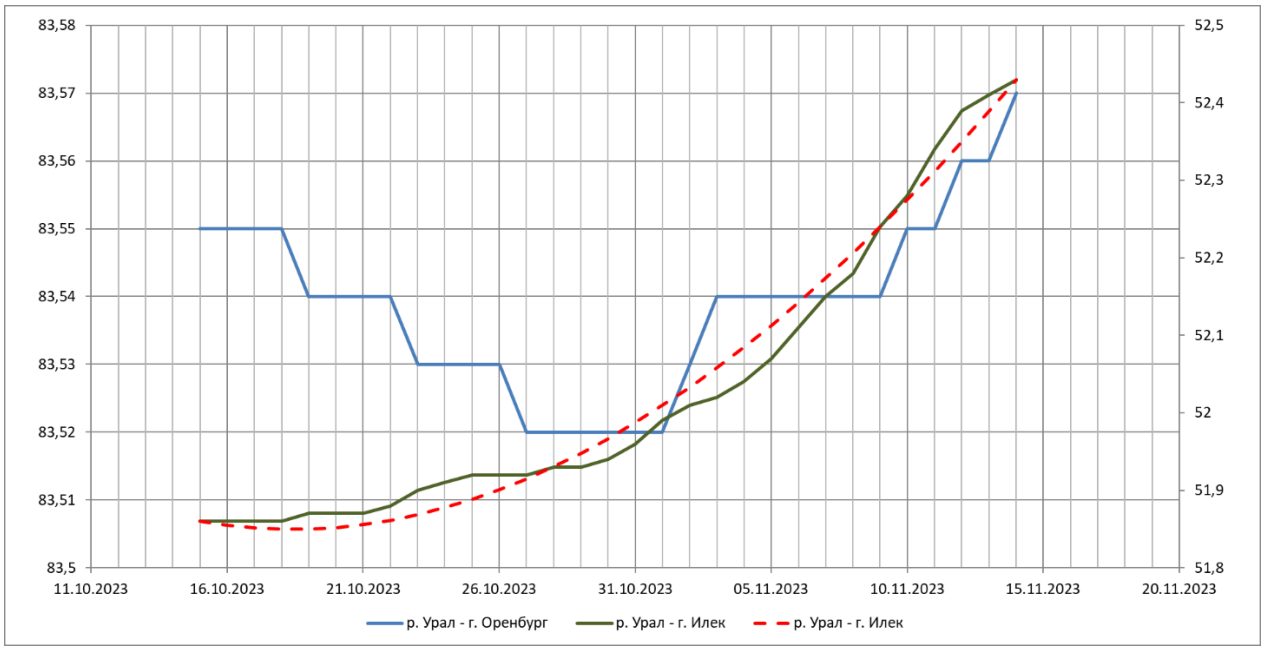
Приложение 63. Прогноз уровня воды за май 2023 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек.



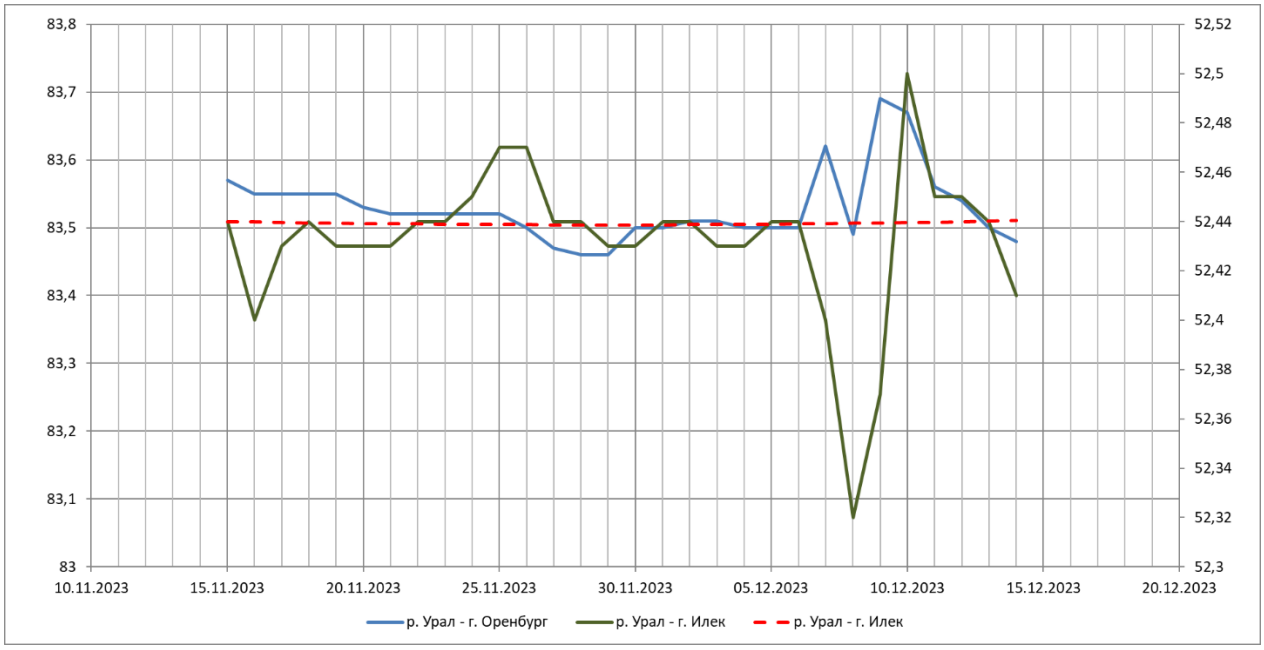
Приложение 64. Прогноз уровня воды за август 2023 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек.



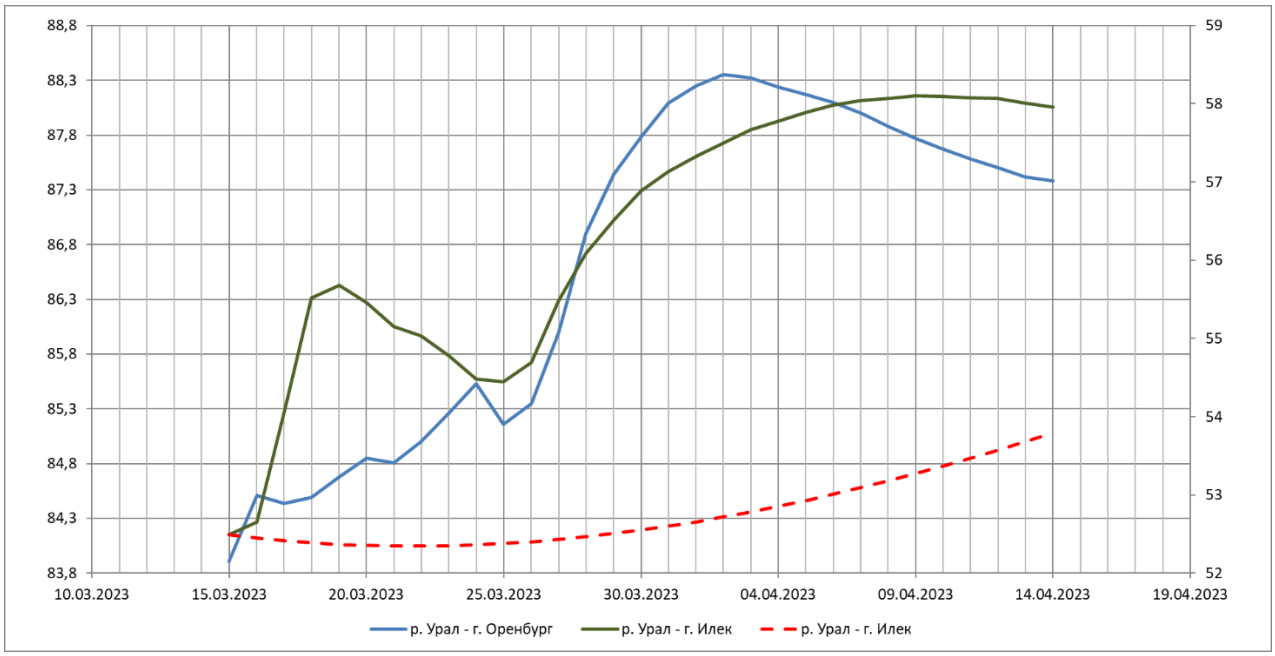
Приложение 65. Прогноз уровня воды за октябрь 2023 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек.



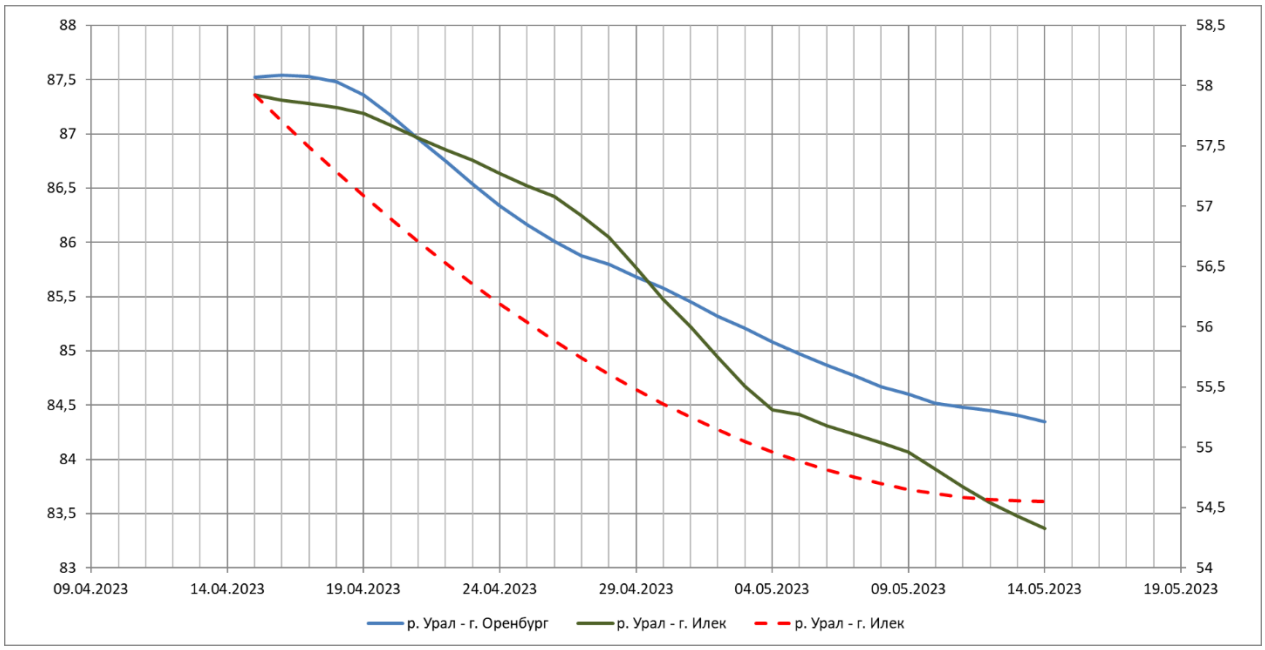
Приложение 66. Прогноз уровня воды за ноябрь 2023 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек.



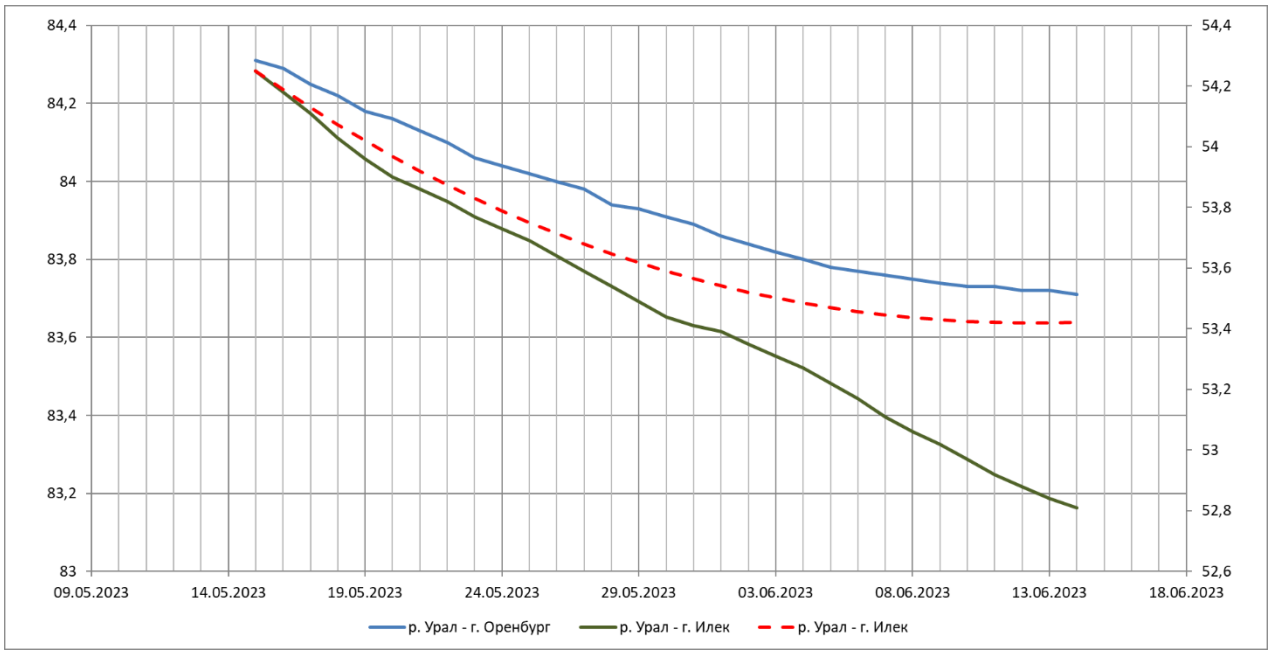
Приложение 67. Прогноз уровня воды за март 2023 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек. Оценка расчётов на независимом материале.



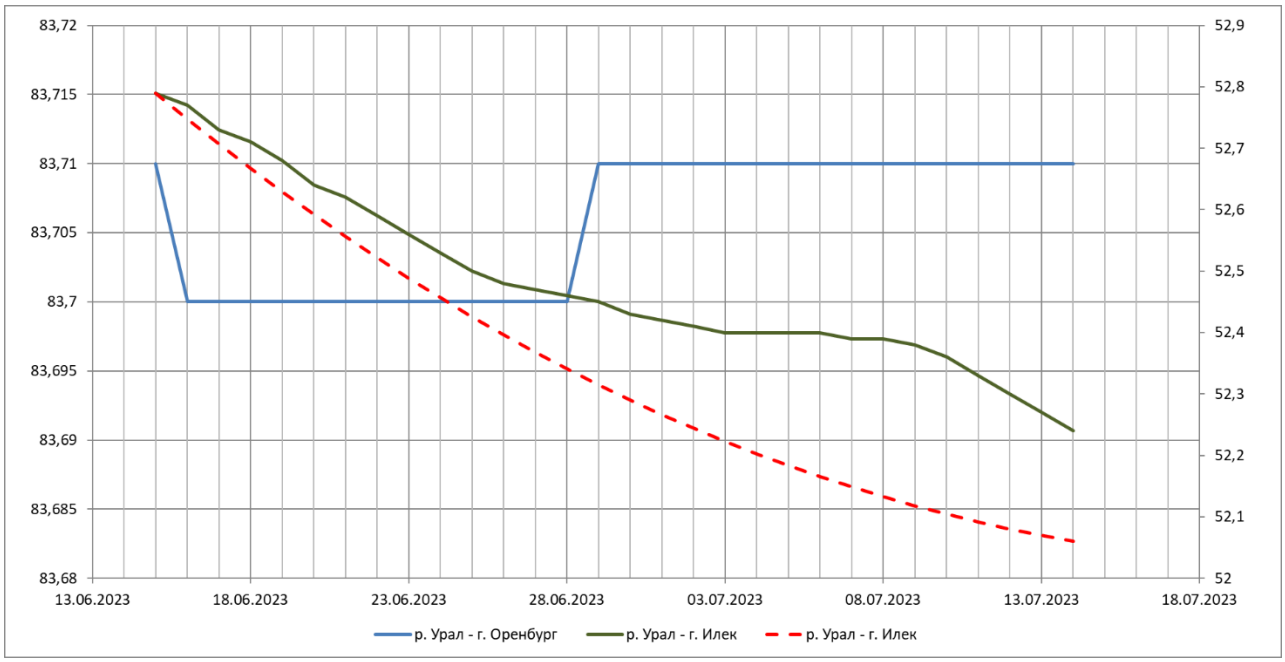
Приложение 68. Прогноз уровня воды за апрель 2023 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек. Оценка расчётов на независимом материале.



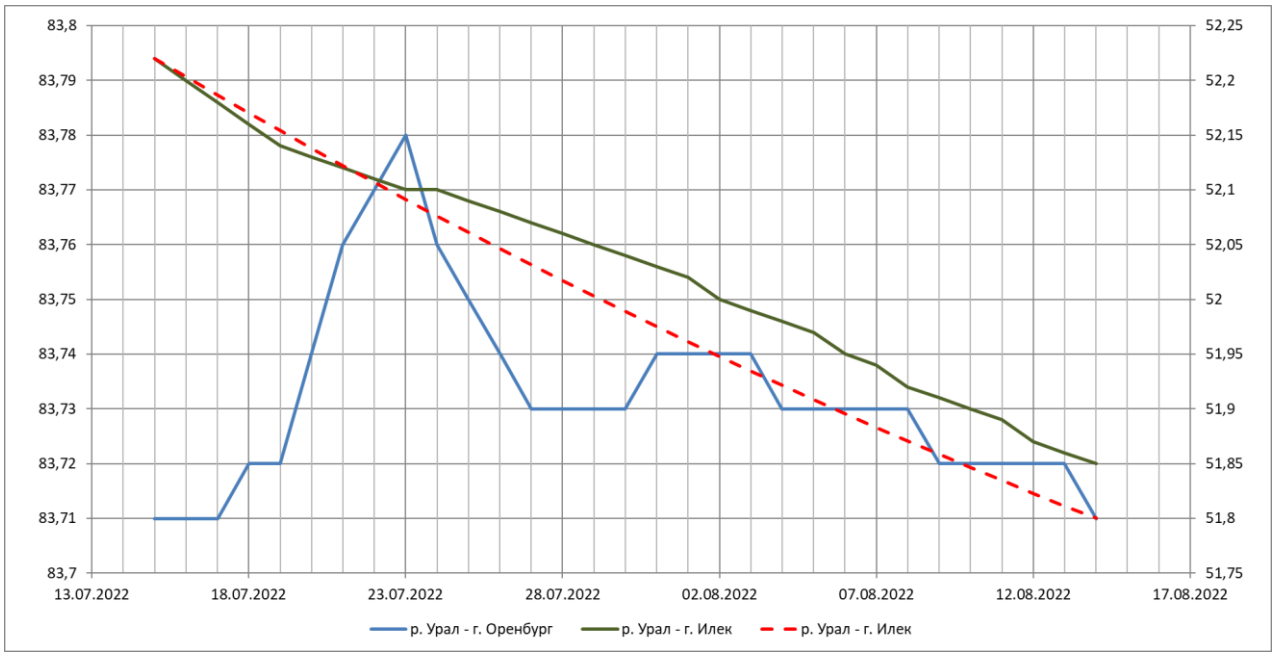
Приложение 69. Прогноз уровня воды за май 2023 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек. Оценка расчётов на независимом материале.



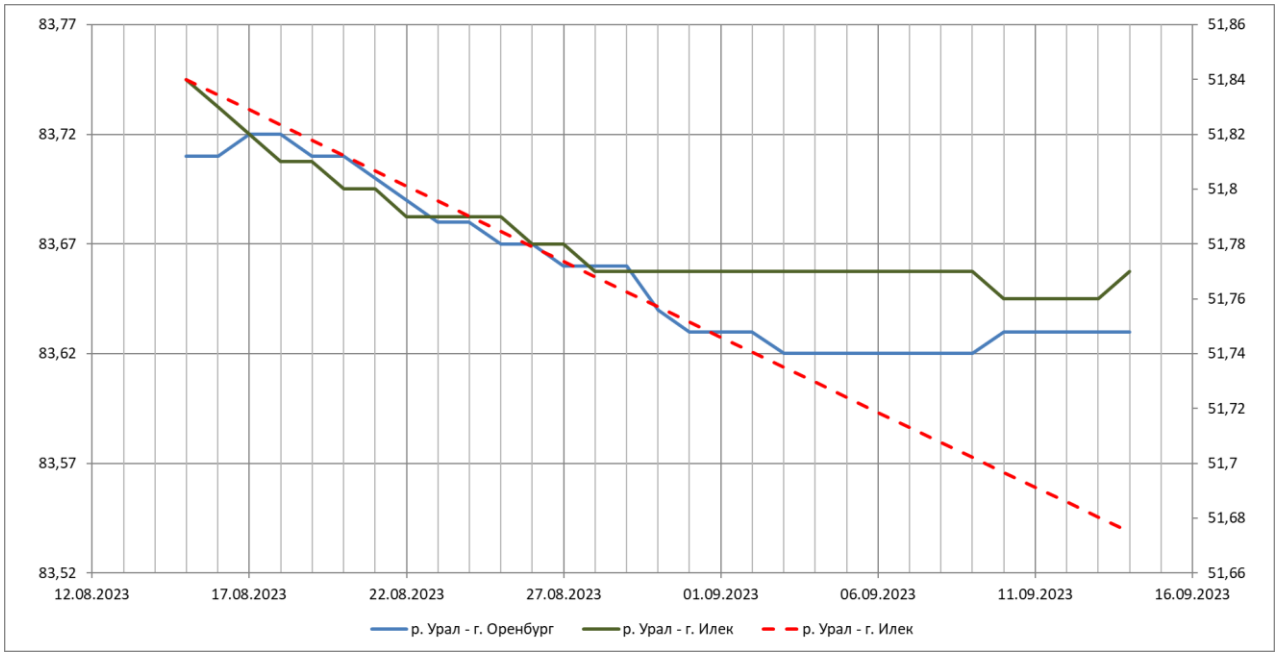
Приложение 70. Прогноз уровня воды за июнь 2023 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек. Оценка расчётов на независимом материале.



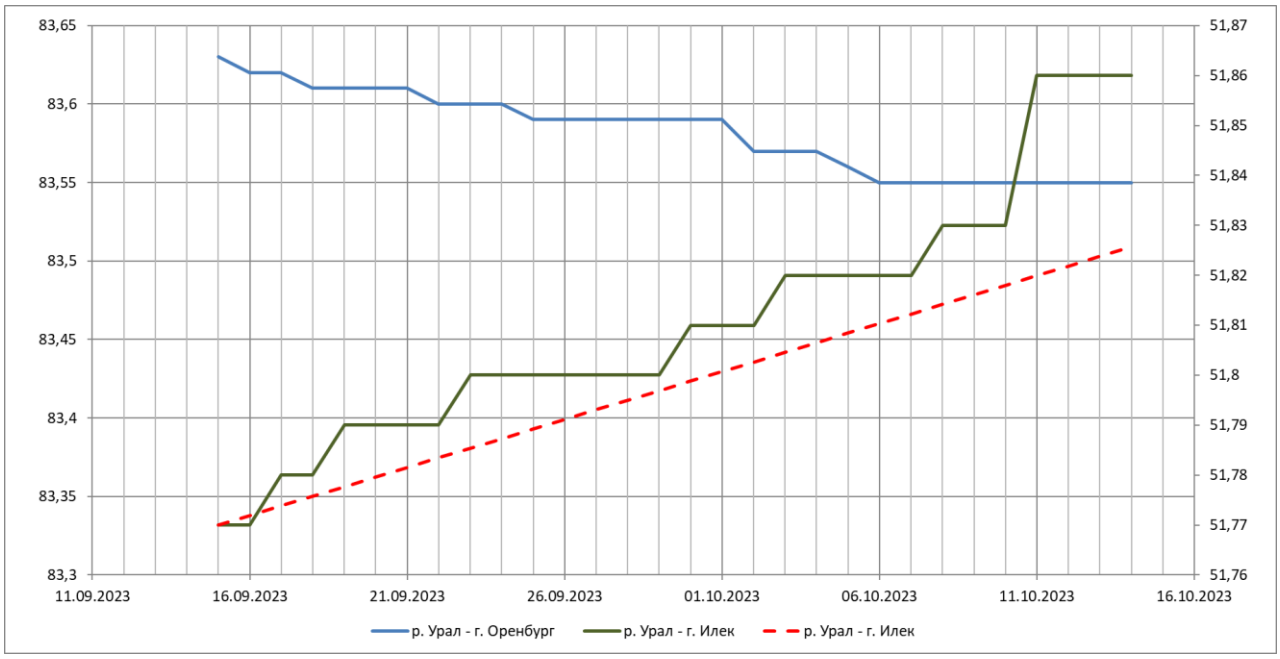
Приложение 71. Прогноз уровня воды за июль 2023 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек. Оценка расчётов на независимом материале.



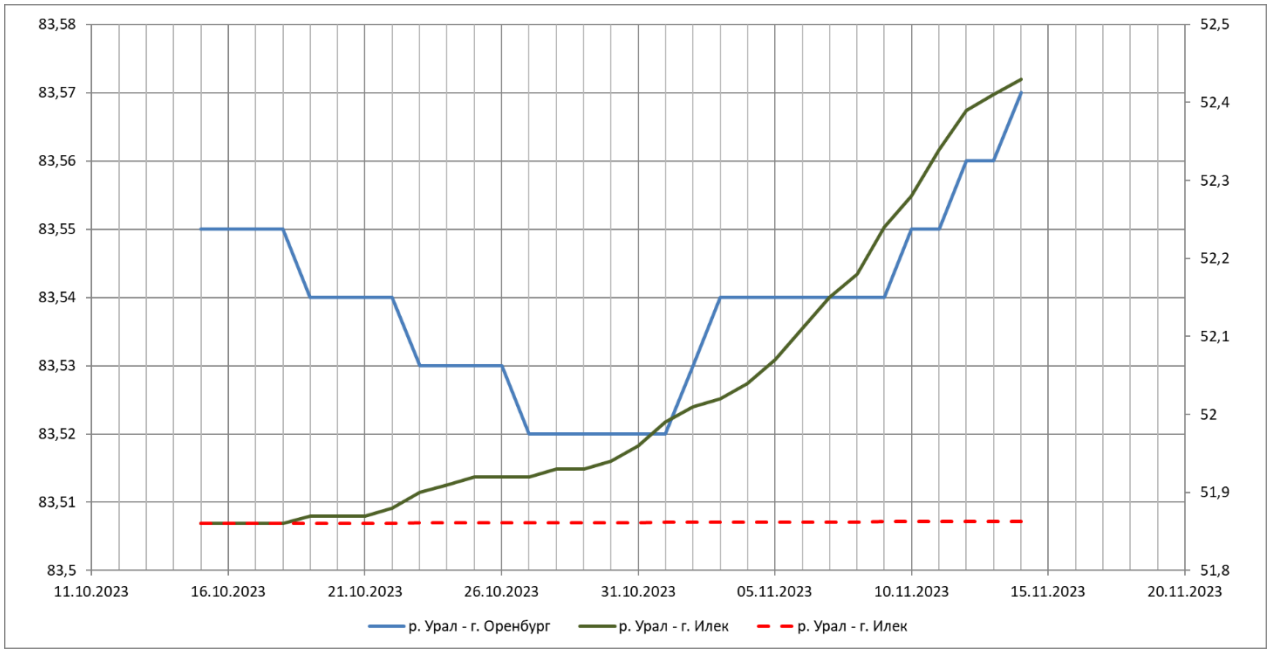
Приложение 72. Прогноз уровня воды за август 2023 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек. Оценка расчётов на независимом материале.



Приложение 73. Прогноз уровня воды за сентябрь 2023 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек. Оценка расчётов на независимом материале.



Приложение 74. Прогноз уровня воды за октябрь 2023 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек. Оценка расчётов на независимом материале.



Приложение 75. Прогноз уровня воды за ноябрь 2023 год р. Урал – г. Оренбург - р. Урал – с. Илек. Оценка расчётов на независимом материале.

