



ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО УПРАВЛЕНИЮ ВОДНЫМИ РЕЖИМАМИ И МОНИТОРИНГУ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ И ВОДОХРАНИЛИЩАХ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ

Проблемы гидрологической безопасности на водных объектах, при эксплуатации водохранилищ и гидротехнических сооружений в настоящее время приобретают все большую актуальность в связи с участвовавшими экстремальными гидрометеорологическими явлениями на юге России и других регионах и имевшими место случаями чрезвычайных ситуаций в результате наводнений, сопровождавшимися значительными материальными потерями и человеческими жертвами.

В целях оптимизации процессов управления водными ресурсами и обеспечения гидрологической безопасности необходимо использование современных методов наблюдения и развитой системы мониторинга параметров окружающей среды, состояния водохранилищ и гидротехнических сооружений. Необходимо использование автоматических средств контроля, обработки данных и математических моделей, обеспечивающих краткосрочное и сверхкраткосрочное прогнозирование происходящих изменений с текущей оценкой уровня опасности и различных факторов риска, а также обеспечения раннего предупреждения неблагоприятных и опасных гидрологических явлений.

В составе такой системы функционально следует выделить: мониторинг текущего состояния и прогнозирования развития гидрологической обстановки на водных объектах и мониторинг безопасности гидротехнических сооружений.

Наиболее актуальные задачи, определяющие безопасность на водных объектах и требующих оперативного контроля с использованием средств автоматизации в реальном режиме времени:

- краткосрочный и сверхкраткосрочный прогноз гидрографов половодий и паводков (с текущей пошаговой коррекцией на скользящем временном отрезке, оценкой уровня опасности и факторов риска) с достаточной заблаговременностью (не менее 3- часов) для принятия решений о раннем предупреждении опасных явлений;

- обеспечение безопасного пропуска максимальных расходов редкой повторяемости сооружениями гидроузла и формирования оперативной противопаводковой ёмкости водохранилища, а также для управления холостыми сбросами;

- прогнозирование изменений гидрологической обстановки на водохранилищах и в их нижних бьефах на всей протяженности водного объекта в результате развития наводнения, в том числе при катастрофических сбросах и возможных гидродинамических авариях;

- мониторинг положения кривой депрессии в теле плотины, противофильтрационных элементах, в местах сопряжения различных типов конструктивных частей плотины, выполненных из различных материалов (бетон-грунт, металл-грунт и т.д.) по замерам уровня воды в наблюдательных скважинах и явлений фильтрации с помощью специальных элементов в теле плотины с интервалом от 1-х суток до 1-го часа;

- контроль за уровнем грунтовых вод в нижнем бьефе гидроузла для оценки изменения фильтрационных расходов воды, для прогноза процессов фильтрации при увеличении или снижении действующих нагрузок и для своевременного принятия управляющих решений по обеспечению фильтрационной безопасности сооружений гидроузла;

- контроль за смещениями и осадками подпорной части гидротехнического сооружения с интервалом от 1-х суток до 1-го часа для оценки деформаций и прогноза изменений при возрастании или снижении нагрузок.

Характеристика водохранилищ Крыма

На Крымском полуострове насчитывается 23 крупных водохранилища (более 1 млн.м³) общим объемом 399,48 млн. м³, которые подразделяются, в зависимости от источника их наполнения, на водохранилища естественного стока и наливные водохранилища Северо-Крымского канала. На растровой карте Крымского полуострова (рис. 1) приведено размещение 15-ти водохранилищ естественного стока: 1 – Чернореченское (р. Черная); 2 – Счастливое-II (бассейн р. Бельбок); 3 – Загорское (р. Кача); 4 – Альминское (р. Альма); 5 – Бахчисарайское (р. Кача); 6 – Партизанское (р. Альма); 7 – Симферопольское (р. Салгир); 8 – Тайганское (бассейн р. Биюк-Карасу); 9 – Белогорское (р. Биюк-Карасу); 10 – Аянское (р. Аян); 11 – Балановское (р. Зуя); 12 – Изобильненское (р. Улу-Узень); 13 – Кутузовское (р. Демерджи); 14 – Льговское (б. Змеиная, приток р. Мокрый Индол); 15 – Старо-Крымское (р. Чорох-Су). Большинство из этих водохранилищ являются горными и предгорными с высотой плотины до 30 м и более.

Таблица 1.

Водохранилища естественного стока Республики Крым

№	Название	Месторасположение	Источник питания (река)	Характеристика при НПУ		Назначение ¹⁾	Ведомств. принадлежность ²⁾
				Площ. зеркала, га	Полный объем, млн.м ³		
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Чернореченское	п.Озерное, г.Севастополь	Черная	604	64,2	В	Севастопольское ПШВКХ
2.	Счастливое II	с.Счастливое, Бахчис. р-н	Манাগотра (басс.р.Бельбок)	67	11,8	В	Минжилкоммунхоз АРК
3.	Загорское	с.Синапное, Бахчис. р-н	Кача	156	23,3	В	Минжилкоммунхоз
4.	Альминское	с.Почтовое, Бахчис. р-н	Альма	80	6,2	О	Рескомводхоз АРК
5.	Бахчисарайское	г.Бахчисарай	Кача	99,5	6,89	О	Рескомводхоз АРК
6.	Партизанское	с.Партизанское, Симф. р-н	Альма	225	34,4	В	Минжилкоммунхоз АРК
7.	Симферопольское	г.Симферополь	Салгир	323	36,0	В,О, ГРЭС	Рескомводхоз АРК
8.	Тайганское	г.Белогорск	б.Джавайганская (басс.р.Биюк-Карасу)	200	13,8	О	Рескомводхоз АРК
9.	Белогорское	г.Белогорск	Биюк-Карасу	225	23,3	О	Рескомводхоз АРК

1	2	3	4	5	6	7	8
10.	Аянское	с.Заречное, Симф. р-н	Аян	40	3,9	В	Минжил- коммун- хоз АРК
11.	Балановское	с.Баланово, Бе- логорский р-н	Зуя	40,7	5,07	О	Реском- водхоз АРК
12.	Изобильненское	с.Изобильное, г.Алушта	Улу-Узень	61	13,25	В	Минжил- коммун- хоз АРК
13.	Кутузовское	с.Нижняя Ку- тузовка, г.Алу- шта	Демерджи	9,38	1,11	В,О	Реском- водхоз АРК
14.	Льговское	с.Долинное, Кировский р-н	б.Змеиная, приток р. Мокрый Ин- дол	27,8	2,2	О	Реском- водхоз АРК
15.	Старокрымское	г.Старый Крым	Чорох-Су	43	3,15	К	Террито- риальная собствен- ность
Всего: 15 водохранилищ				2201,3	253,12		

Примечание: ¹⁾ Обозначения: О – орошение, В – водоснабжение, К – комплексное
²⁾ Названия ведомств соответствуют моменту до вхождения Крыма в состав РФ

Особенность горных и предгорных водохранилищ, в отличие от равнинных, проявляется в том, что объём форсировки уровня (от НПУ до ФПУ) относительно небольшой, и при пропуске паводков редкой повторяемости этого объёма часто недостаточно для трансформации паводкового стока.

Характер работы водохранилищ при пропуске максимального половодного стока рассмотрим на примере наиболее крупного Чернореченского водохранилища.

Гидрография реки Черная

Река Черная относится к рекам северного макросклона Крымских гор и к гидрологическому подрайону – северо-западные склоны, относящемуся к бассейну Черного моря. Протекает она с юго-востока в северо-западном направлении и впадает в Севастопольскую бухту Черного моря.

Линейная гидрографическая схема р. Черная приведена на рис. 2. Здесь указаны основные притоки и гидросты, два из которых являются действующими.

Река Черная (*Чергунь, Чер-Су, Казыклы-Узень, Биук-Узень*) начинается у села Родниковское (бывш. *Скеля*) мощным Скельским источником, расположенным между южными склонами горы Курт-Кая и северными склонами горы Кара-Даг. Этот источник даёт главную часть стока реки, его дебит 40 – 220 л/с. По правому берегу выклинивается ряд источников с дебитом 1 – 150 л/с. В засушливые годы часть их пересыхает. Длина реки 35 км, площадь водосбора 427 км², среднегодовой расход воды в устье 1,62 м³/с, что составляет 51,1 млн. м³ в год.



Рис. 1. Водохранилища естественного стока на растровой карте Крыма

Верхнее течение реки находится в Байдарской долине. По склонам гор, окружающих эту долину, стекает ряд водотоков, питающих р. Чёрную. Самый верхний приток – Узунджа, истоком которой является источник Суук-Су, вытекающий из двух трещин в отвесной известковой скале на высоте 768 м. Питается Суук-Су осадками, выпадающими на яйле и просачивающимися сквозь толщу гор. Вода источника на некотором протяжении течёт по речному руслу открытым потоком, а затем скрывается в наносах. В нижнем течении русло реки, как правило, сухое и наполняется водой только во время ливней и паводков. По крутому левому склону Узунджинской долины проходит горная дорога. Здесь открыта для посещения Скельская сталактитовая пещера, объявленная ещё в 1947 г. памятником природы.

В пределах Байдарской долины река Чёрная принимает основные свои притока, берущие начало на северных склонах Ай-Петринской яйлы. Вдоль некоторых из них по давно забытым тележным тропам можно подняться на Ай-Петринскую яйлу. Дороги носят названия оврагов – Капуркайская, Календская, Малташская, Дерменкойская, по которым текут реки, соответственно, Боса, Календа, Арманка, Байдарка. Все тропы из Байдарской долины сходятся на Ай-Петринской яйле, у Чёртовой лестницы (Шайтан-Медвень, медвен-Богаз). До строительства дороги Ялта – Севастополь через Байдарский перевал Чёртова лестница была единственным проходом через Главную гряду.

Байдарскую долину река Чёрная пересекает с юго-востока на северо-запад на протяжении около семи километров с небольшим, всё уменьшающимся уклоном. В центре Байдарской долины на р. Чёрная построено самое крупное в Крыму Чернореченское водохранилище (27,4 [28,9] км от устья). Строилось оно для водоснабжения Севастополя, жители которого, в основном, пользовались горько-солёной водой из колодцев. Строительство первой очереди окончилось в 1956 г. Земляная плотина из суглинка длиной 1082 м и высотой 28 м образовала водохранилище полным объёмом 33,2 млн. м³. Воду получили Севастопольский водоканал и Чернореченская оросительная система. В 1979 – 1984 гг. плотину нарастили на 8 м, полный объём водохранилища достиг 64,2 млн. м³, а полезный – 61,2 млн. м³. Длина плотины увеличилась до 1274 м. Площадь зеркала возросла до 6,04 км², а длина водохранилища составила 3,34 км. Теперь притоки в пределах Байдарской долины (Боса, Арманка, Календа, Бага Верхняя, Бага Нижняя) впадают в Чернореченское водохранилище.

Ниже водохранилища р. Черная принимает два значительных притока. Левый приток Байдарка, длиной 11 км, берёт начало на северо-западных склонах Байдарской яйлы, протекает в верхнем течении по непроходимому ущелью Дермен-Дере и впадает в р. Черную у с. Широкое. В верховьях уклон реки значительный (70 ‰), а после выхода в Байдарскую долину резко уменьшается.

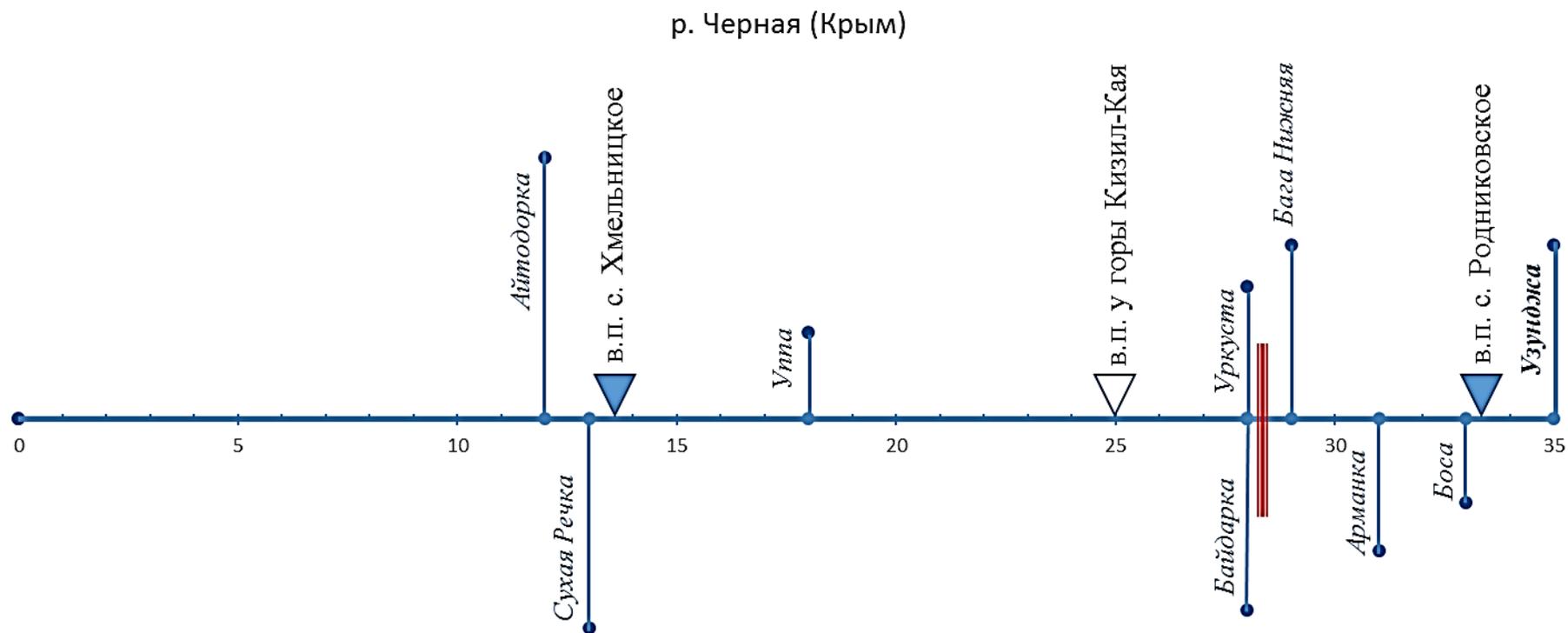


Рис.2. Линейная схема р. Черная

С правого берега в Черную впадает многоводный приток Уркуста, в нижнем течении которого построено водохранилище объёмом 3 млн. м³. Вдоль Уркусты проходит дорога в соседнюю долину реки Бельбек, через перевал Беечку (Медвежий).

Река Черная прорезает Байдарскую долину на северо-западе корытообразным ущельем. Здесь река вступает в самый длинный в Крыму Чернореченский каньон, простирающийся с юго-востока на северо-запад на восемь км. По каньону река протекает в извилистой теснине, сдавленной с обеих сторон скалами высотой 250 – 300 м. Одиноко стоящие утёсы имеют высоту до 580 м. На склонах можно увидеть громадные выступы, напоминающие по форме крепостные бастионы, колонны, пирамиды, усеянные дубами и можжевельником. Расстояние между склонами 50 – 300 м. Крутые скалистые склоны покрыты кустарником и лиственным лесом. Чернореченский каньон местами труднопроходим, русло реки изобилует порогами, перекатами, каскадами и навалами каменных глыб.

В пределах Чернореченского каньона, с правого берега впадает р. Уппа, ниже устья которой появляются пойменные участки, используемые ранее под сады и огороды.

Чернореченский каньон объявлен памятником природы в 1947 г., а с 1990 г. он входит в ландшафтный заказник «Байдарский».

Ниже каньона р. Черная течёт по Инкерманской долине, последние два километра – практически без уклона по ровной низменной долине и впадает в Севастопольскую бухту. Морская вода здесь поднимается вверх по течению и вытесняет речную воду.

В пределах Инкерманской долины в р. Черную впадают два притока: слева Сухая речка (длина 12 км), а справа – Ай-Тодорка (15 км).

Сухая речка протекает по непроходимому каньону, по правому борту которого проходит автотрасса Ялта – Севастополь, пересекающая реку в нижнем течении. Местность здесь представляет собой систему невысоких горных вершин в сочетании с глубокими ущельями. Среди них в устье чётко выделяется гора Гасфорта с максимальной отметкой 217 м, представляющая собой ископаемый коралловый риф, сложенный мраморизированными известняками. В районе горы происходит резкая смена лесных ландшафтов безлесыми, занятыми в настоящее время большей частью виноградниками, небольшими участками степных ландшафтов и кустарниковых зарослей. Северный склон горы покрывает можжевельно-дубовый лес, а южный и восточный склоны – лесокустарниковые заросли. Долины огибающих гору рек (Черной и Сухой Речки) заняты посёлками, пустошами, виноградниками. На горе произрастает реликтовая роща можжевельника древовидного высокого. Гора создаёт особый микроклимат. Температура летом здесь ниже, чем в среднем по Севастополю, построенному на скальном грунте. В июльско-августовский зной именно отсюда ветры несут прохладу в юго-восточные пригороды Севастополя. Показатели основных рек-притоков приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Перечень основных водотоков в бассейне р. Черная

№ п/п	Река	Куда впадает	Какой берег	Расстояние от устья, км	Длина, км	Площадь водосбора, км ²
1	2	3	4	5	6	7
1	Узунджа (Суук-Су, Узень)	Черная	прав.	35,0	10,0	46,6
2	Боса	Вдхр.	лев.	33,0	4,8	8,72
3	Календа	–"–	лев.	31,0	5,4	3,43

1	2	3	4	5	6	7
4	Арманка	–"–	лев.	31,0	7,6	12,0
5	Бага Верхняя	–"–	прав.	29,0	5,9	6,47
6	Бага Нижняя	–"–	прав.	29,0	10,0	21,3
7	Байдарка	Черная	лев.	28,0	11,0	62,8
8	Уркуста	–"–	прав.	28,0	7,6	20,0
9	Уппа	–"–	прав.	18,0	5,0	15,9
10	Сухая Речка	–"–	лев.	13,0	12,0	51,7
11	Айтодорка	–"–	прав.	12,0	15,0	38,1

Гидрологическая изученность бассейна реки

В настоящее время в бассейне р. Черная действующими остались два водомерных поста на реке Черной (табл. 3). Периодически открывались посты на других реках бассейна (Узунджа, Боса, Календа, Арманка, Бага Верхняя, Бага Нижняя, Байдарка) сроком действия от одного года до пятнадцати лет. По реке Черной имеются данные в материалах Росгидромета по закрытым в/п у горы Кизил-Кая, с. Широкое (ниже впадения р. Уркуста), ст. Инкерман (3 км от устья). В целом, следует отметить что изученность бассейна реки удовлетворительная. Водомерный пост у горы Кизил-Кая действовал 62 года (с 1926-го по 1988 гг.). Действующий в/п у с. Родниковское был открыт ещё в 1916 году, хотя несколько раз переносился, и имеет довольно продолжительный ряд гидрологических наблюдений. Прошло уже почти 30 лет, как прекратилась публикация «Гидрологических ежегодников» и 50 лет после издания в 1966 г. монографии «Ресурсы поверхностных вод СССР».

Таблица 3 – Действующие гидропосты на р. Черная

Река – гидропост	Открыт	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Средняя высота водосбора, м	Средний уклон водосбора, ‰	Средне-взвешенный уклон реки, ‰
р. Черная – с. Родниковское	1916	33	47,6	730	271	20,0
р. Черная – с. Хмельницкое (Чернореченское)	1946	11	342	520	-	10,8

Отсутствие данных гидрометрических наблюдений за последние годы затрудняет оценку водных ресурсов не только р. Черной, но и вообще всех рек Крыма. На рис. 3 приведено фото гидрометрической рейки на в/п с. Хмельницкое (бывший пост с. Чернореченское).

Характеристика водосбора и русла р. Черная

Водосборный бассейн р. Черная (рис.4) характеризуется следующими показателями.

Площадь водосборного бассейна (водосбора) – 427 км².

Форма водосбора – «грушевидная»

Длина водосбора – 31 км.



Рис. 3. Река Чёрная у гидрологического поста в селе Хмельницкое



Рис. 4. Космоснимок водосбора р. Черная на Крымском полуострове.

Средняя ширина водосбора – 13,8 км.

Максимальная ширина водосбора – 18,1 км.

Коэффициент формы водосбора – $\frac{L}{F^{0,56}} = 1,18$.

Густота гидрографической сети – по бассейну изменяется от 0,7 км/км² в верховьях до 0,2 км/км² в нижней части бассейна, в среднем по бассейну – 0,35 км/км².

Площадь водохранилищ и прудов – 7,18 км² (1,7 % от площади водосбора), в том числе 2 водохранилища (Чернореченское и в нижнем течении р. Уркуста) – 6,31 км², и 17 прудов – 0,87 км².

Средний уклон склонов водосбора $I_{ск} = 100$ ‰

Средняя высота водосбора над уровнем моря – 430 м.

Водосбор Чернореченского водохранилища (рис. 5) имеет форму, распластанную в ширину, но его форма аналогична форме водосборов по в/п Родниковское и у горы Кизил-Кая. Гидрографические показатели водосбора Чернореченского водохранилища приведены в таблице 5.

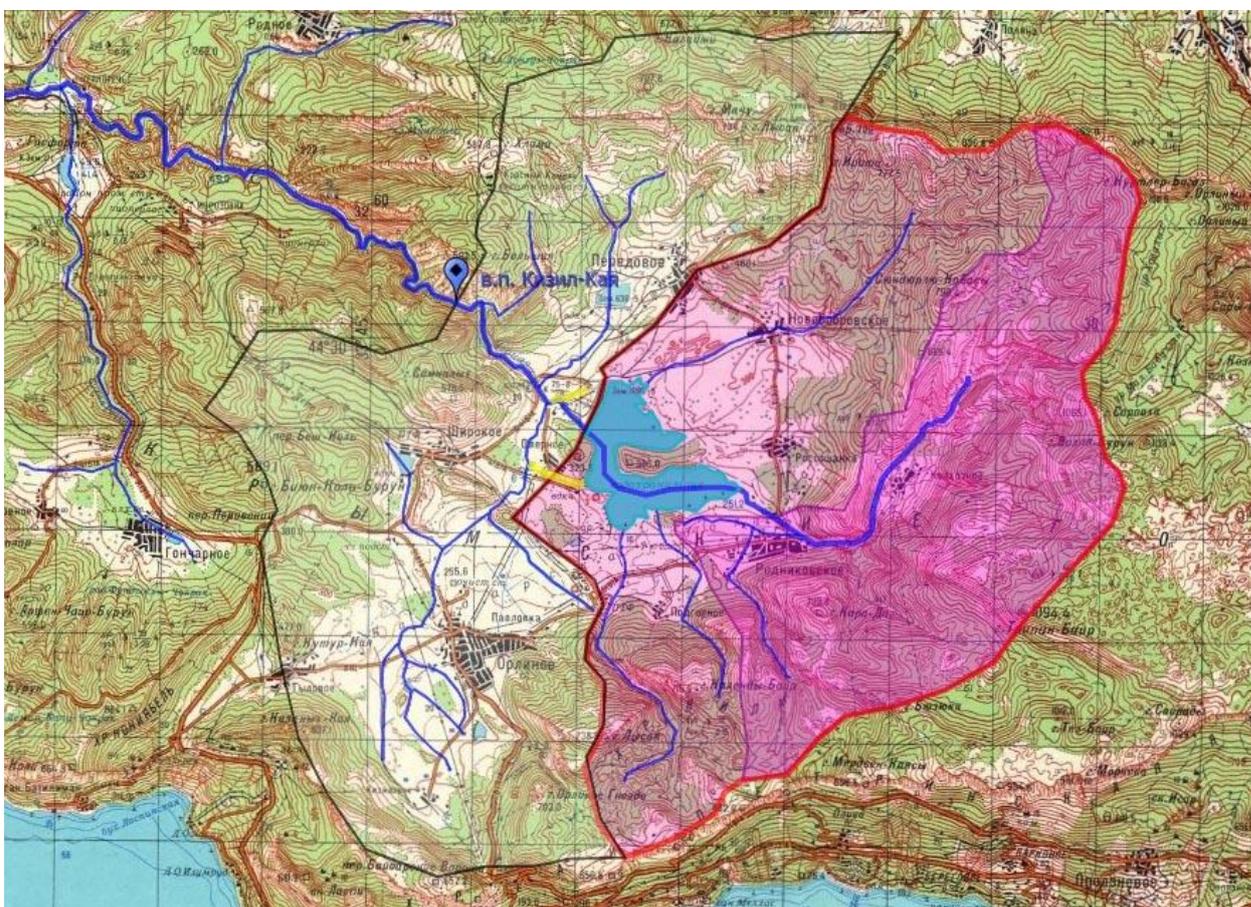


Рис.5. Водосбор Чернореченского водохранилища

Таблица 4 – Основные гидрографические характеристики водосбора водохранилища

Площадь водосбора, км ²	Средняя высота водосбора, м	Расстояние от устья, км	Длина русла (с притоком Узунджа), км	Уклон русла, ‰	Уклон склонов, ‰	Площадь прудов и водохранилища, км ²
108	600	28,9	16,1	4,8	201	6,06

Длина водосбора – 8,4 км.

Средняя ширина водосбора – 12,8 км.

Максимальная ширина водосбора – 16,4 км.

Коэффициент формы водосбора – $\frac{L}{F^{0,56}} = 0,61$.

Густота гидрографической сети – 0,7 км/км².

Продольный профиль р. Черная (составлен по карте М 1:25000) приведен на рисунке б. Средневзвешенный уклон реки на протяжении 35 км составляет 7,4 ‰. По длине реки можно выделить четыре участка с характерными уклонами. Участок верховий реки, пересекающий Байдарскую долину, имеет уклон русла 4,83 ‰ и на этом участке расположено Чернореченское водохранилище.

Начиная от скалы Кизил-Кая на границе Байдарской долины, река Черная протекает в извилистой теснине, сдавленной с обеих сторон почти отвесными скалами высотой в несколько десятков метров. Местами это каньонообразное ущелье труднопроходимо: русло реки изобилует обширными перекатами и каскадами, навалами каменных глыб, уклон русла – 21,4 ‰.

Течение ослабляется после того, как р. Черная входит в Инкерманскую долину; уклон на этом участке около 4,0 ‰.

Последние два километра река практически без уклона по ровной низменной долине и впадает в Севастопольскую бухту.

Русло реки относится к врезанному типу русел горных рек (по классификации МГУ), порожисто-водопадное, с неразвитыми аллювиальными формами. Такие русла характеризуются равномерным распределением глубин по длине потока, нарушаемым крупными валунами и глыбами. На реках этого типа соблюдается практически для любой точки русла соотношение $h/\Delta < 5$, где h – глубина потока над выступом шероховатости высотой Δ .

При входе в Инкерманскую долину крупность донных отложений уменьшается, в гравелисто-галечниковом русле увеличивается количество мелких фракций наносов (< 10 мм).

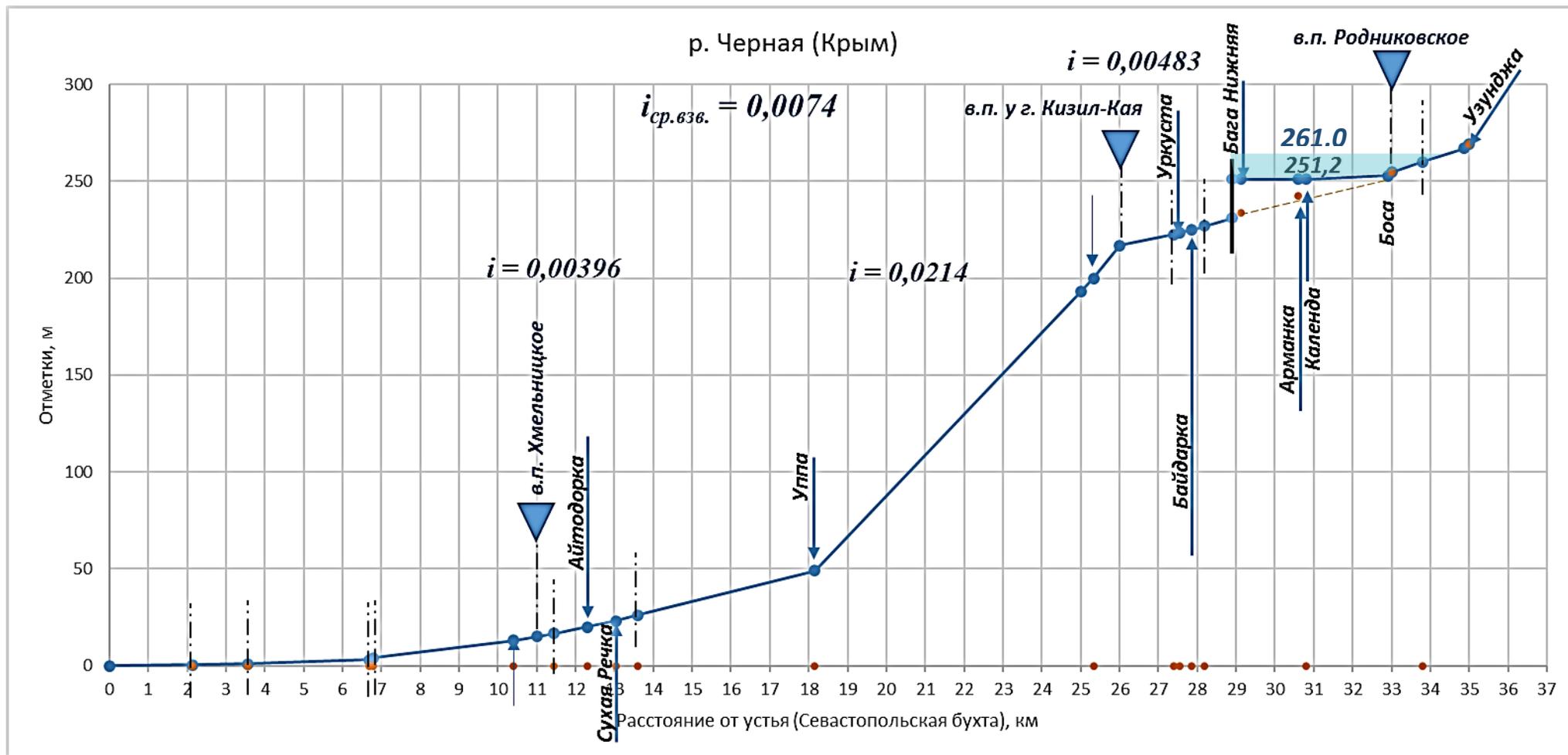


Рис.6. Продольный профиль р. Черная (Крымский полуостров)

Норма, изменчивость и внутригодовое распределение годового стока р. Черная

Река Черная, как и большинство рек Крыма, относится к категории малых рек. Влияние местных факторов на сток здесь велико, но учёт его практически невозможен, что затрудняет прогноз стока. Основной причиной этого является несовпадение поверхностных и подземных водосборов. К факторам, нарушающим связь стока с площадью водосбора, следует отнести также наличие бессточных областей на плоских закарстованных вершинах гор, которые при расчётах из общей площади бассейна не исключаются, хотя в процессе формирования стока практически не участвуют. Попытка построения зависимостей $M_0 = f(F)$ для отдельных районов Крыма в общем не привела к положительным результатам. Однако для рек, стекающих с западного склона Крымских гор (р. Черная) такая связь сравнительно чётко выражена.

Что же касается нормы стока и коэффициента вариации годового стока, то такая связь выражена не чётко. Анализ данных различных источников, включая и современный этап изучения гидрологии рек Крыма, могут быть приняты следующие статистические характеристики годового стока р. Черная для створа гидроузла Чернореченского водохранилища:

- модуль годового стока $M_0 = 17,0$ л/с·км²;
- норма стока $Q_0 = 1,84$ м³/с;
- коэффициент вариации годового стока $C_v = 0,36$;
- коэффициент асимметрии $C_s = 1,04$;
- объём годового стока $W_0 = 58,03$ млн. м³.

Для створа гидроузла Чернореченского водохранилища расчётное сезонное и внутригодовое распределение стока в характерные годы может быть принято по гидропосту с. Родниковское. Такое решение связано с тем, что приток в водохранилище обеспечивается в основном по реке Черная. В средневодный год приток с остальной части водосбора составляет всего 14,6% от поступления стока в водохранилище. В маловодный год и того меньше.

Принятые расчётные характеристики сезонного стока для створа гидроузла Чернореченского водохранилища:

- в многоводный год объём стока паводочного сезона – 79,5%, меженного – 20,5%;
- в средний год, соответственно, – 86,1% и 13,9%;
- в маловодный год, соответственно, - 90,4% и 9,6%;
- в очень маловодный год – 92,1% и 7,9%;
- коэффициент вариации паводочного периода – 0,46; меженного периода – 0,86;
- коэффициент асимметрии паводочного периода – 0,92; меженного периода – 2,0.

Максимальный сток

В «Правилах эксплуатации Чернореченского водохранилища» (Укргипроводхоз, Киев, 1980) приведены данные расчётного максимального стока в створе гидроузла на момент их составления (табл. 5).

Таблица 5 - Максимальные расчётные расходы р. Черной в створах водомерных постов и створе гидроузла, м³/с

P = 0,01		P = 0,1%	1%	5%	10%
без гарантийной поправки	с гарантийной поправкой				
с. Родниковское					
415	482	262	153	95,5	75,0
у горы Кизил-Кая					
930	1116	564	310	181	137
Максимальные расчётные расходы р. Черная в створе Чернореченского водохранилища					
780	655	410	230	140	106
Объёмы максимального стока в створе Чернореченского водохранилища, млн. м ³					
76	90	55	36	24,5	19

Примечание: объёмы максимального стока в створе Чернореченского водохранилища получены по прямой графической интерполяции между водомерными постами у с. Родниковское и у горы Кизил-Кая.

На реке Черной, наряду с ливневыми паводками, которые наблюдаются в любое время года, наблюдаются также и смешанные паводки, образующиеся в результате снеготаяния с одновременным выпадением дождей. Так, наблюдаемый абсолютный суточный максимальный расход за многолетний период у в/п с. Родниковское на 10.06.1949 г. составлял 126 м³/с (за тёплый период), а у в/п гора Кизил-Кая – 222 м³/с (за холодный период).

В «Правилах...» приводится также расчётный гидрограф паводка с максимальным суточным расходом обеспеченностью 0,1 % по модели 1939 г. Характеристики гидрографа: $Q_{0,1\%} = 410$ м³/с; продолжительность паводка $T = 5,5$ сут.; продолжительность периода подъема $t_n = 1,25$ сут.; периода спада – $t_c = 4,25$ сут.; $t_n / t_c = 0,29$.

На рис. 7 показаны также теоретические гидрографы паводка, построенные по известному уравнению Г.А. Алексева при различных значениях коэффициента формы гидрографа $\lambda = q_p \cdot t_n / (0,0116h_p) = 0,7; 0,8; 1,0$ и коэффициентах несимметричности паводка, соответственно, $k_s = 0,31; 0,33; 0,36$.

Из приведенных теоретических гидрографов наиболее близким по форме и по объёму стока является гидрограф при $\lambda = 0,8$ ($k_s = 0,33$). При слое стока за паводок обеспеченности 0,1% – $h_p = 510$ мм, объём паводка будет равен $W_{0,1\%} = 55,1$ млн. м³.

р. Черная - створ гидроузла Чернореченского водохранилища
P = 0,1 %

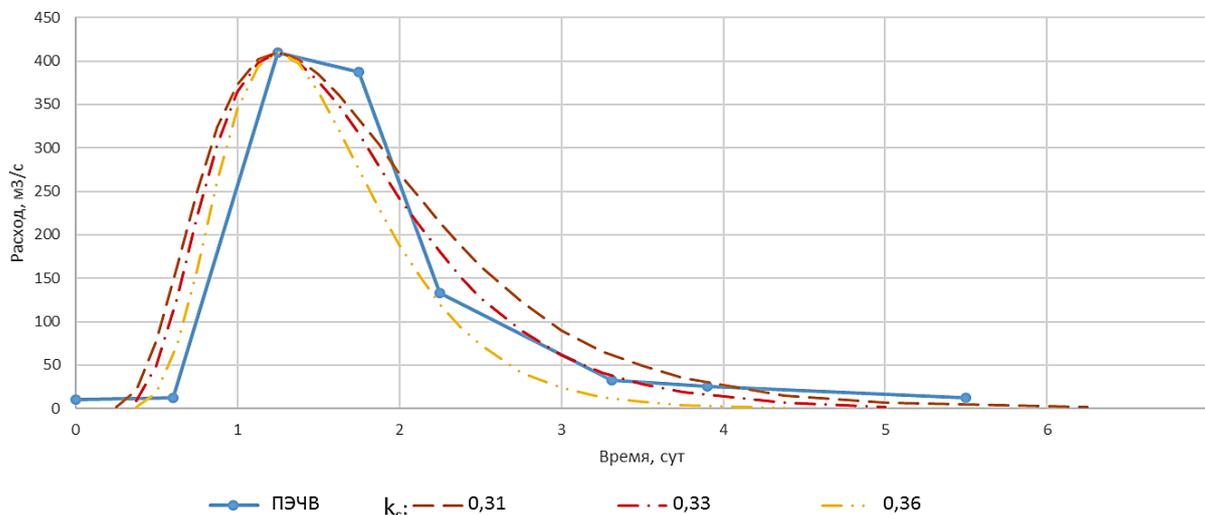


Рис.7 Расчётный гидрограф паводка с максимальным суточным расходом обеспеченностью 0,1 % $Q_{0,1\%} = 410$ м³/с.

Данные о максимальных расходах стока р.Черной из разных источников («Правила...»), Ресурсы поверхностных вод СССР, данные Государственного водного кадастра и др. имеют существенные различия). Поэтому были выполнены дополнительные расчеты с учетом современных актуальных данных и методических положений (СП 33-101-2003. Определение основных расчётных гидрологических характеристик. Издание официальное. – М. : Росстрой России, 2004) на основе формулы предельной интенсивности стока (ПИС).

Таким образом, мы имеем четыре ряда значений максимального стока (табл. 6), полученных анализом фондовых материалов и расчётом. Графическое представление о величинах расходов воды в расчётном створе показано на рис. 8.

Таблица 6 – Расчётные расходы гидроузла Чернореченского водохранилища

Источник информации	Обеспеченность P, %						
	0,01	0,1	1	3	5	10	25
«Правила...», 1980 г.	655 (780)	410	230	-	140	106	
Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 6: Украина и Молдавия Выпуск 4: Крым, 1966 г.	400 (480)	297,1	193,1	146,0	124,3	94,7	59,1
Тимченко З.В. Гидрография и гидрология рек Крыма : монография / Смферополь : ИТ «АРИАЛ», 2012: в/п у горы Кизил-Кая			257,7	-	144,3	103,1	59,3
в пересчёте на створ ГУ	420	310	211,3	-	118,3	84,6	48,6
Формула предельной интенсивности стока (СП 33-101-2003.	550 (660)	370	232	162	130	93,0	53,4

В скобках приведено значение расхода с гарантийной поправкой

Расчёты по формуле предельной интенсивности стока, конечно, дают завышенные результаты по сравнению с результатами статистического анализа рядов стока, но эта разница не превышает 19,7 % для расхода 1% обеспеченности, в то время как непродолжительные наблюдения не могут давать репрезентативную картину.

Есть два равнозначных варианта окончательного решения: либо принимаются расчётные расходы из «Правил...», либо результаты расчётов по формуле предельной интенсивности стока, рекомендуемой СП 33-101-2003 при отсутствии данных гидрометрических наблюдений.

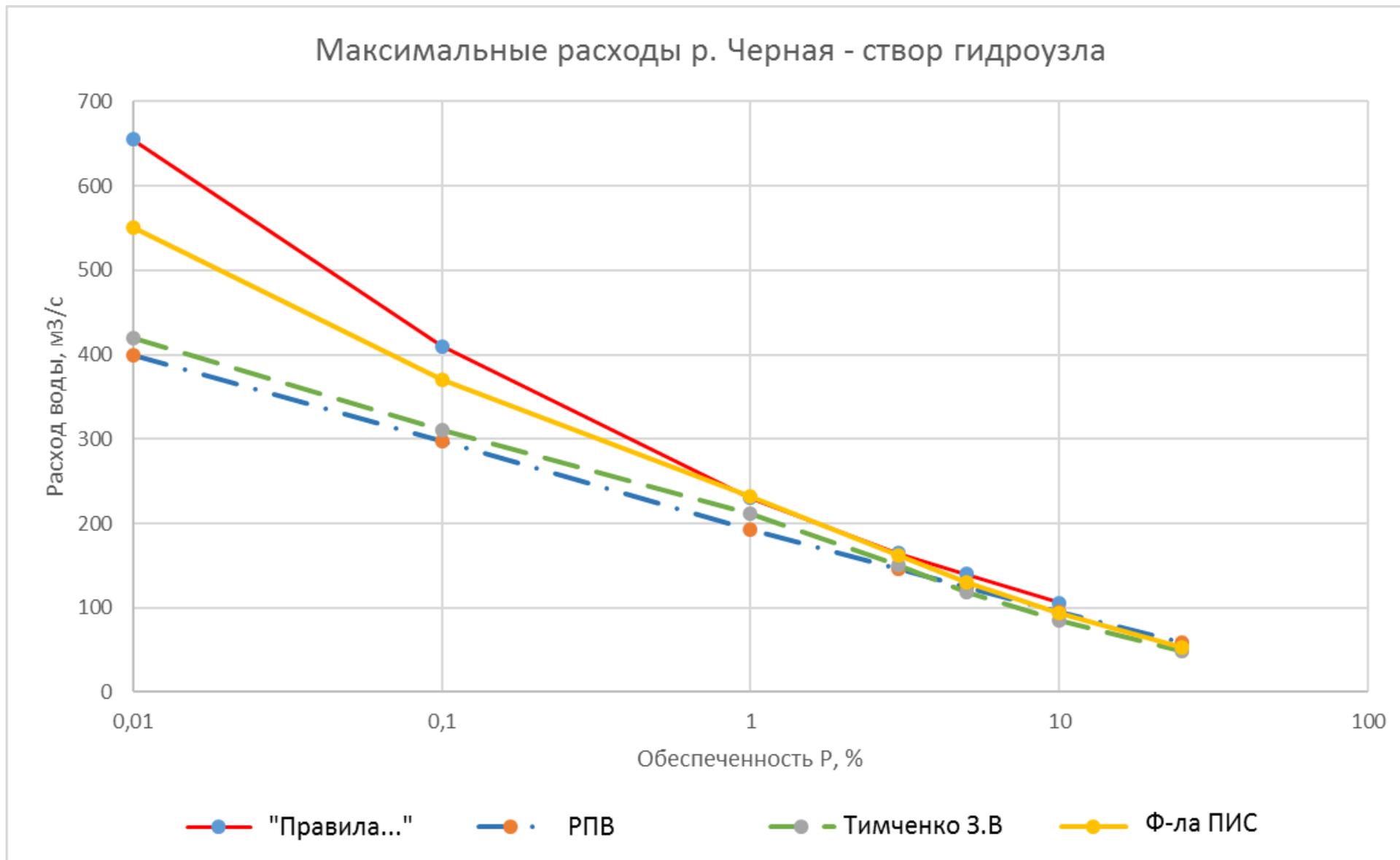


Рис. 8. Кривые обеспеченности максимальных расходов р. Черная – створ гидроузла

Оценка пропуска паводков через гидроузел Чернореченского водохранилища

Чернореченское водохранилище имеет назначение – водоснабжение г.Севастополя. Объем водохранилища при НПУ $64,2 \text{ м}^3$ (полный), $61,2 \text{ м}^3$ (полезный). Отметка НПУ 261,0 м; ФПУ – 263,2 м; УМО – 241,5 м, отметка гребня плотины – 264,1 м.

Плотина земляная, насыпная с экраном из местных грунтовых материалов, дамба насыпная с ядром и зубом из местных грунтовых материалов. Максимальный напор при НПУ 31,7 м; наибольшая высота плотины 36 м, длина плотины по гребню 1274 м, ширина гребня 10 м.

Гидротехническое сооружение второго класса ответственности

При оценке пропуска паводка Чернореченским гидроузлом обеспеченностью 0,1% и продолжительностью паводка 5,5 суток с максимальным расходом $660 \text{ м}^3/\text{с}$ расчётом получено, что при наполненном до НПУ водохранилище возможно поднятие уровня воды на 1,0 м выше ФПУ. При объеме водохранилища – 64,2 млн. м^3 , объём форсировки уровня – 16,8 млн. м^3 .

При расчётном объёме паводка 89,4 млн. м^3 этого объёма не хватает для его трансформации без переполнения водохранилища, что влечёт за собой опасность разрушения гидроузла. Неглубокая сработка уровня воды в водохранилище (до объёма 54 млн. м^3) не исправляет ситуацию с переполнением его, а только несколько снижает подъём уровня выше ФПУ.

Для того, чтобы выйти на уровень ФПУ необходима более глубокая предпаводковая сработка уровня в водохранилище (до отметки 256,40 м БС – объём воды – 40 млн. м^3). Графики уровней воды, поясняющие сказанное, приводятся на рис. 9 и 10.

Предпаводковая сработка водохранилищ, конечно, является эффективным средством для обеспечения безопасности гидроузлов при пропуске паводков редкой повторяемости, однако учитывая назначение водохранилища не допускается холостой сброс для обеспечения гарантийного водопотребления в маловодные периоды года. Из-за опасения того, что водохранилище не будет наполнено, предпаводковая сработка возможна при достоверном прогнозе притока. В свою очередь несвоевременная сработка водохранилища может повлечь за собой переполнение водохранилища и создаст аварийную ситуацию.

С другой стороны, срочная предпаводковая сработка водохранилища для предотвращения аварийной ситуации, как и пропуск дополнительных максимальных расходов может создавать негативные и опасные явления в нижнем бьефе по мере добегающих расходов сбросов водохранилища.

В таких ситуациях необходим контроль и оценка гидрологической ситуации в бассейне на основе автоматизированного мониторинга и сверхкраткосрочного прогноза гидрологической обстановки в бассейне на основе гидродинамических моделей в составе мониторинга, функционирующего в реальном масштабе времени.

Прогнозная ситуация должна оцениваться с временным запасом достаточным для оповещения населения и должностных лиц, реализации превентивных мер в случае риска неблагоприятных и опасных гидрологических явлений.

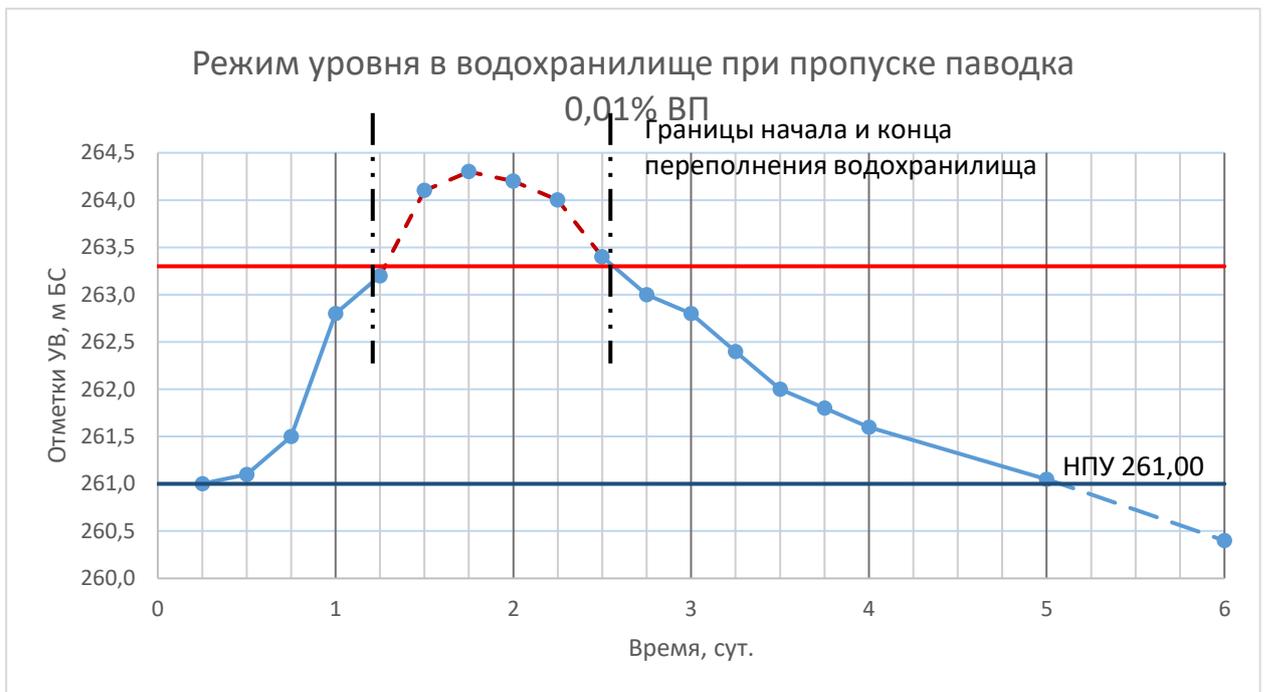


Рис. 9. Динамика уровня воды в водохранилище при пропуске половодья существующими сооружениями при наполнении до НПУ.

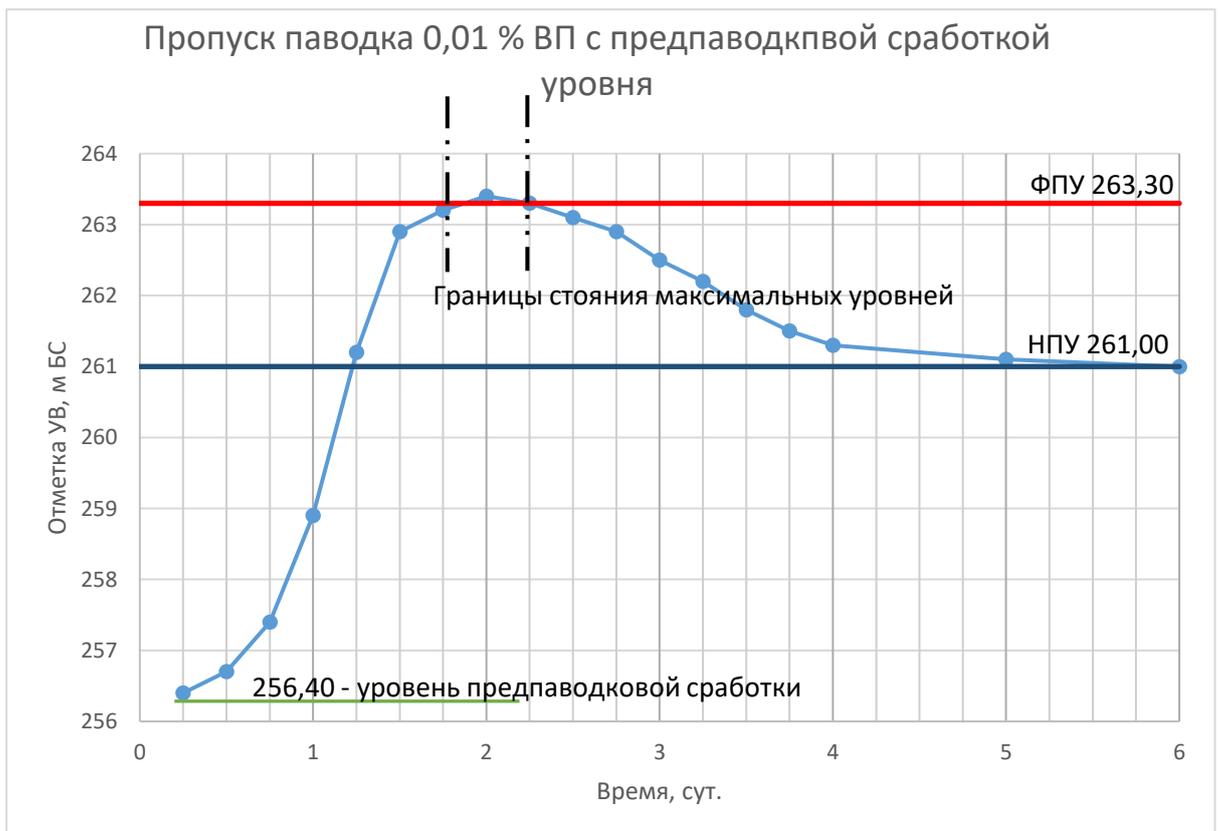


Рис. 10. Динамика уровня воды в водохранилище при пропуске половодья существующими сооружениями при предпаводковой сработке.

Предложения по структуре мониторинга гидрологической безопасности

Чернореченское водохранилище можно рассматривать как аналог для большинства других водохранилищ Крыма для которых актуальна задача краткосрочного и сверхкраткосрочного планирования водных режимов и сходны задачи безопасной эксплуатации.

Предпаводковая сработка водохранилищ без достоверных прогнозов по срокам и объёму паводка может создать ситуацию, когда воды не будет хватать для обеспечения хозяйственных нужд потребителей.

Таким образом, подход к назначению уровня предпаводковой сработки должен основываться не только на среднесрочном прогнозе притока к створу гидроузла с посуточным шагом, но и на *сверхкраткосрочном* прогнозе с заблаговременностью от одного часа до суток в режиме пошаговой коррекции на скользящем временном отрезке. Учитывая особенности водного режима рек Крыма, когда паводки наблюдаются и в зимне-весенние и летне-осенние периоды, т.е. практически в течение всего года в случае выпадения экстремальных осадков, такой подход становится особенно актуальным.

В связи с этим предлагается в комплексе мероприятий по обеспечению безопасности сооружений Крымских гидроузлов создание автоматизированной системы мониторинга и прогнозирования состояния водных объектов в зоне влияния водохранилищ (далее Система).

Целями такой Системы являются:

- прогнозирование изменения гидрологического режима на водосборе водохранилища и информационное обеспечение принятия обоснованных решений для управления водохозяйственным объектом;
- предупреждение чрезвычайных ситуаций на водном объекте и прилегающих к нему территориях;
- обеспечение безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений.

Данная Система базируется на:

- результатах измерений в реальном масштабе времени уровней рек и водоемов, интенсивности жидких осадков и других параметров окружающей среды;
- компьютерном моделировании гидравлического режима рек для оперативного прогнозирования времени добегания расходов к створам гидроузлов и в нижнем бьефе.

Прогнозирование колебания уровней в водохранилищах проводится в реальном масштабе времени. Организуется оповещение должностных лиц о выходе контролируемых параметров за установленные пределы и выдаются рекомендации для осуществления заблаговременных попусков воды из водохранилищ в целях сглаживания нежелательных колебаний уровней у плотин гидроузлов и в нижнем бьефе.

Автоматизированная система в зоне влияния водохранилища, в условиях возможного проявления угроз природного и техногенного характера, позволяет проводить регулярные взаимовязанные контрольные наблюдения, сбор, накопление и хранение данных наблюдений, сопоставление измеренных значений диагностических показателей с их критериальными значениями, а также проводить оперативную оценку состояния водных объектов для информирования службы эксплуатации, органов исполнительной власти, заинтересованных в безаварийном состоянии ГТС, на местном (локальном), региональном (территориальном) и федеральном уровнях с целью принятия обоснованных решений.

Принятие решения об изменении режима работы гидроузла производится дежурными операторами системы управления на основании оперативных данных о режиме водотоков и оценочных и прогнозистических расчётов.

Решение об оповещении населения в случае угрозы паводковой ситуации принимают уполномоченные лица.

Рассматриваемая Система состоит из трех основных подсистем:

- подсистема оперативного сбора данных (ПОСД) – территориально распределенный комплекс автоматических постов наблюдения за осадками на водосборной площади водохранилищ и уровней воды в водных объектах;

- подсистема гидрологического моделирования на основе математических моделей в системе осадки-сток и гидравлики водных объектов по входным и верифицирующим данным ПОСД;

- подсистема накопления, хранения, аналитической обработки, отображения и представления гидрологической и другой диагностической информации, выдачи рекомендаций по регулированию режимов гидроузлов, оповещения должностных лиц о выходе контролируемых параметров за установленные пределы.

На постовом уровне данной Системы основой является измерительный комплекс ЭМЕРСИТ, широко используемый в системе мониторинга водных объектов Краснодарского края.

В зависимости от поставленных задач, посты наблюдения комплектуются датчиками, позволяющими измерять:

- уровень зеркала воды рек и открытых водоемов (точность измерения уровня воды составляет ± 3 мм);

- направление и скорость ветра, атмосферное давление, температуру и влажность воздуха;

- количество (интенсивность) и вид осадков (способен различать пять видов осадков: дождь, снег, град, снег с дождем, морось);

- высоту снежного покрова и толщину льда;

- температуру на поверхности и заданной глубине почвы;

- содержание химически опасных и токсичных веществ в атмосферном воздухе по уровню опасности;

- мощность фонового эквивалента дозы гамма-излучения.

Имеется также возможность включения в состав системы сейсмостанций.

Включение конкретных из перечисленных функций в измерительный комплекс зависит от поставленных задач проведения измерений.

В целом совокупность постов наблюдения за уровнем зеркала воды в реках, водохранилищах и интенсивностью осадков позволяют создать систему оперативного контроля возникновения опасности наводнения или подтопления и обеспечить заблаговременный прогноз времени и места возможного наступления ЧС паводкового характера.

Система функционирует в двух основных режимах:

- штатный режим (при установившемся гидрологическом режиме водного объекта);

- режим резкого изменения водности или возникновения неблагоприятного, или опасного явления.

Схема размещения автоматических гидрологических комплексов для измерения гидрологических и метеорологических характеристик и в целом система мониторинга, прогнозирования и выдачи рекомендаций по управлению водными режимами водохозяйственной системы в зоне влияния гидроузла (на примере Чернореченского водохранилища) приведена на рис. 11.

Типовая схема функционирования мониторинга гидрологической безопасности представлена на рис. 12.

р. Черная (Крым)

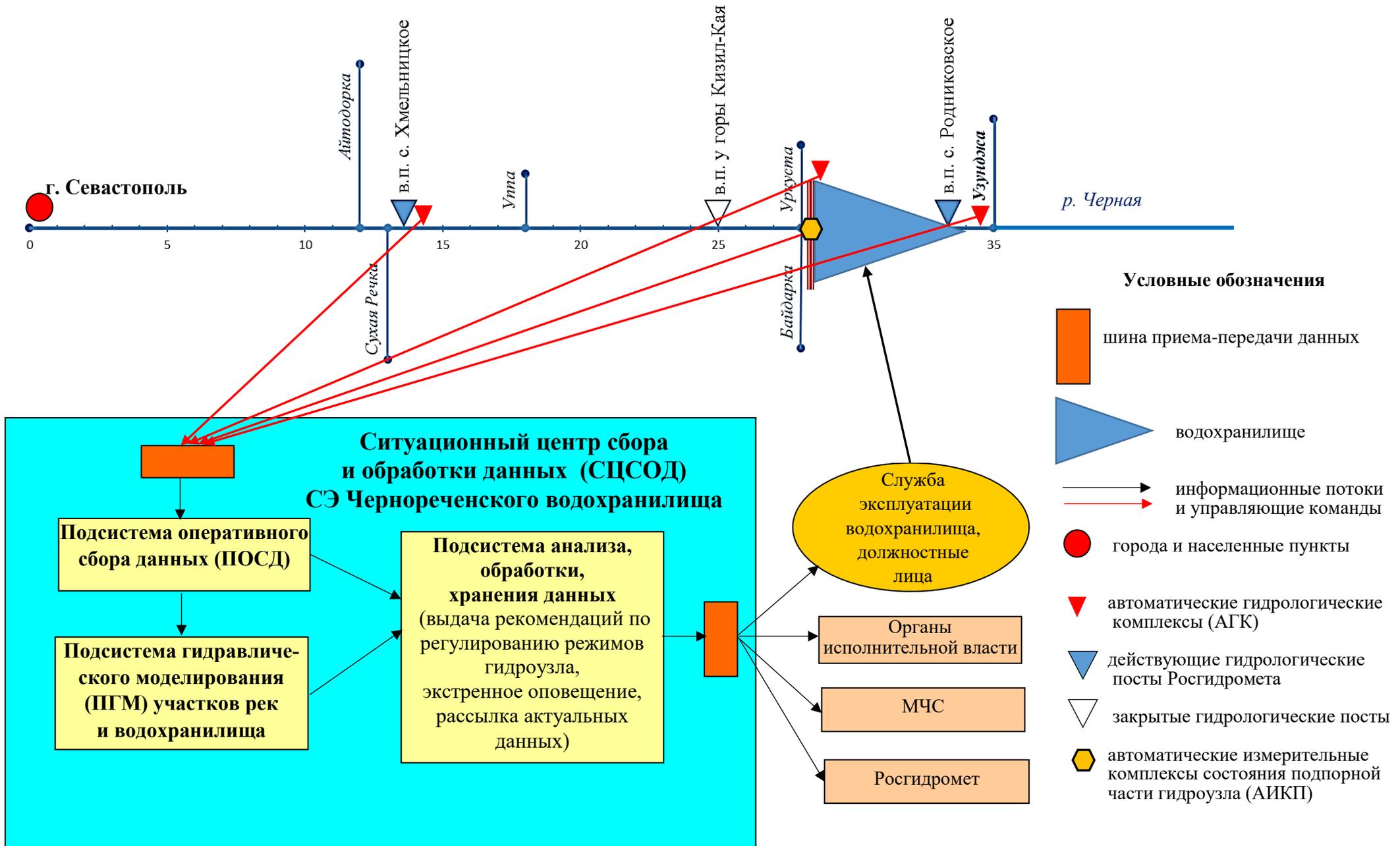
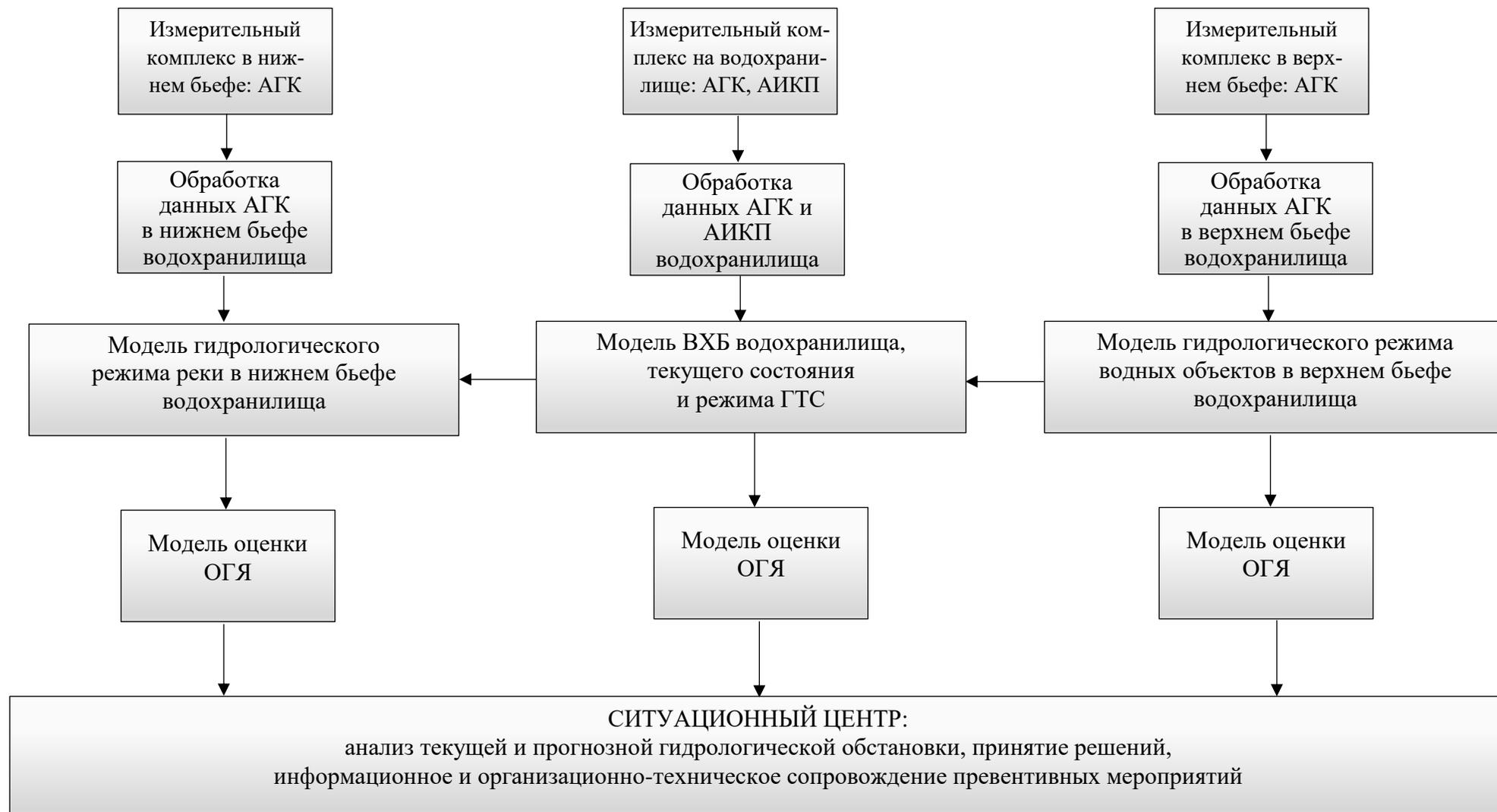


Рис.11. Схема организации автоматизированного мониторинга гидрологической безопасности в зоне влияния Чернореченского водохранилища



Пояснения к схеме

ГТС – гидротехническое сооружение; ОГЯ – опасное гидрологическое явление; АГК – автоматический гидрологический комплекс; АИКП – автоматизированный измерительный комплекс подпорной части гидроузла; ВХБ – водохозяйственный баланс

Рис. 12. Типовая схема функционирования системы мониторинга гидрологической безопасности в зоне влияния водохранилища

Разрабатываемая система в целом базируется на следующих технологических комплексах:

- Технология измерения параметров окружающей среды (сенсорный уровень);
- Технология сбора и передачи информации о состоянии окружающей среды;
- Технология аналитической обработки параметров окружающей среды, прогноза опасных и неблагоприятных явлений, расчета рисков;
- Технология представления (визуализации) аналитической, прогнозной и текущей информации для конечного пользователя;
- Технология оперативного оповещения должностных лиц и сил реагирования о достижении уровня рисков критических отметок.

Реализация выделенных блоков базируются на различных технологических платформах.

Технологический комплекс 1. Технология измерения параметров окружающей среды (сенсорный уровень). В рамках рассматриваемого проекта, основные физические величины, играющие основополагающую роль для обеспечения прогноза паводков и наводнений: уровень воды в реке (водоеме) и количество осадков за промежутки времени, оцениваемые распределенно по территории.

В основе реализации данной технологии лежит измерительный комплекс «ЭКОР». Указанный комплекс опционально может включать датчики измерения уровней рек и открытых водоемов, а также осадки в точках измерения (в т.ч. в твердой и жидкой фазе) и другие метеорологические параметры (ветер, текущая влажность воздуха, атм. давление).

Данный измерительный комплекс внесён в Государственный реестр средств измерения (Свидетельство RU.C.34.021.A №48573 от 21.11.2012) и рекомендован также как и его модернизированный аналог "ЭМЕРСИТ" по областям применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. Программное обеспечение указанных измерительных комплексов и центра сбора информации внесено в Государственный реестр программ для ЭВМ.

Технологический комплекс 2. Технология сбора и передачи информации о состоянии окружающей среды.

В качестве основы для построения подсистемы сбора и передачи данных используется специализированный контроллер «Эмерсит-М40», спроектированный ООО «Эмерсит».

Для экономии электроэнергии, в состав контроллера входит управляемый блок питания (включающий в т.ч. солнечный модуль), который подключает измерительные системы, датчики и системы связи только на время измерения или передачи данных. Для ведения оперативного архива данных используется накопитель на SDCard. Для связи с измерительными системами используются интерфейсы SDI-12 и RS485, GPIO (счетный вход). Передача данных от поста к серверу может производиться по проводным сетям (Ethernet) и каналам связи сотовых или спутниковых операторов. Для организации связи по спутниковым каналам используются низкоорбитальные группировки. Модем сотовой связи поддерживает работу с двумя операторами (в новой модификации с четырьмя).

Технологический комплекс 3. Технология аналитической обработки параметров окружающей среды, прогноза опасных и неблагоприятных явлений, расчета рисков.

Вся поступающая от постов наблюдения информация анализируется сервером и пишется в базу данных. Пост наблюдения получает квитанцию об успешной доставке сообщения. Служба аналитической обработки данных, получив извещение о поступлении новой порции измерений, производит сравнение измерений с заданными критериями и осуществляет расчет прогноза расхода (уровня) воды в заданных створах. Если прогнозируемый уровень воды превышает отметки НЯ (ОЯ), то производится расчет возможной зоны подтопления и вероятностный расчет ущерба (риска). В случае обнаружения любого вида опасности, аналитическая служба извещает об этом подсистему оповещения должностных лиц.

Прогноз расходов, уровней воды и зон затопления на участках и в заданных створах рассчитывается на основе комплекса моделей гидравлики паводковых явлений, разработки специалистов новочеркасской школы гидрологов.

Система моделей паводковых явлений рассматриваемого водосборного бассейна включает несколько взаимосвязанных блоков моделей:

- 1) модели «осадки-сток» с элементарных (структурно выделяемых на основе специальной методики) участков водосбора, примыкающих к русловой сети;
- 2) модели руслового добега (кинематической волны) неустановившегося водного потока к расчетным створам по выделенной гидрографической сети;
- 3) модели затопления (подтопления) прилегающих участков при выходе воды на пойму;
- 4) модели трансформации водного потока за счет влияния русловых подпорных, водопропускных, сопрягающих и регулирующих гидротехнических сооружений, в том числе в случае разрушения напорного фронта плотин в русле.

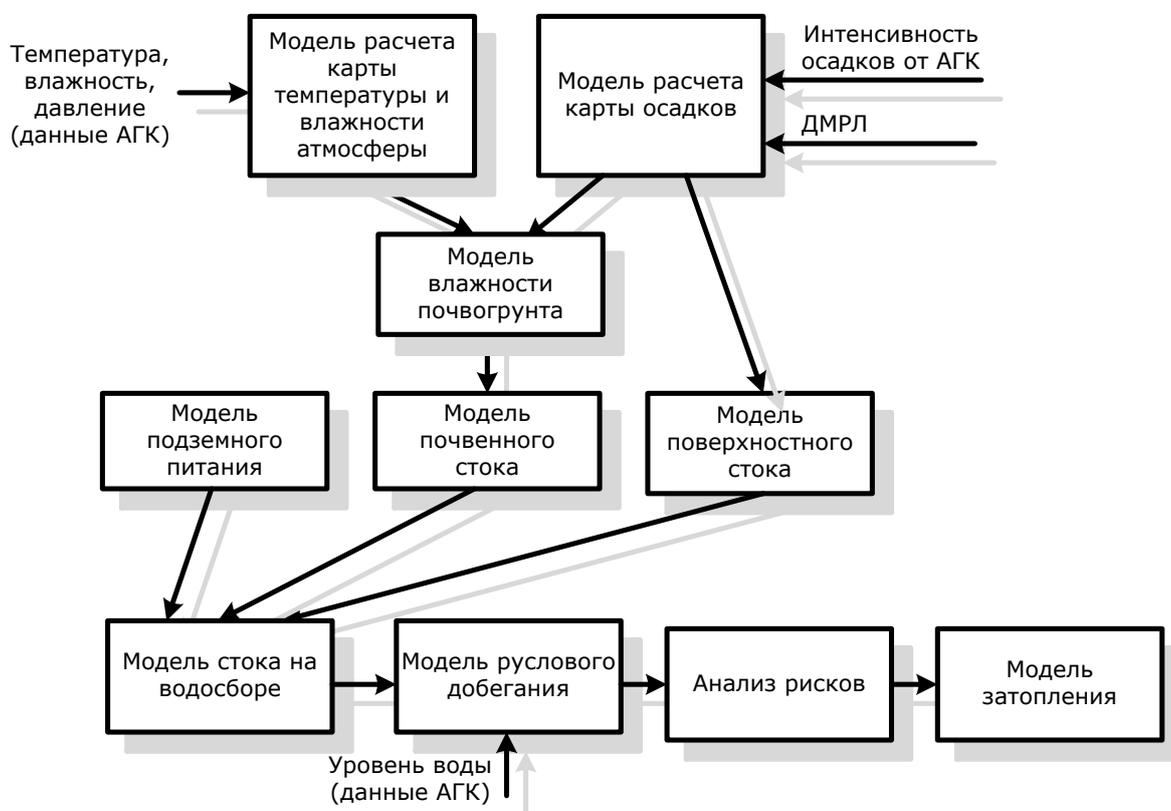


Рис.13 Реализуемая модель прогнозирования распространения паводковых явлений

Технологический комплекс 4. Технология представления (визуализации) аналитической, прогнозной и текущей информации для конечного пользователя. Визуализация информации о текущем и прогнозном состоянии водных объектов осуществляется с использованием web-технологий.

Учитывая возможность размещения ресурса в открытом доступе, различаются три группы пользователей, одна из которых анонимная и две группы авторизованных пользователей. Первая группа авторизованных пользователей – это оперативные дежурные ЕДДС муниципальных образований, служб эксплуатации ГТС, подразделений МЧС, сил спасения и пр. Для этой группы доступен весь функционал системы, включая модельный блок.

Вторая группа авторизованных пользователей представляет собой должностных лиц, ответственных за эксплуатацию системы. Этой группе пользователей доступна вся телематическая информация, получаемая от постов наблюдения и сервера гидрологических прогнозов.

Технологический комплекс 5. Технология оперативного оповещения должностных лиц и сил реагирования о достижении уровня рисков критических отметок.

Подсистема оповещения, получив от службы аналитической обработки извещение о наступлении (или вероятном наступлении) опасного или неблагоприятного явления, в зависимости от степени угрозы (риска) и места возникновения тревоги, задействует соответствующий сценарий оповещения.

В качестве каналов доставки тревожных сообщений используются сети стационарных и сотовых операторов связи. Сообщения являются голосовыми и формируются посредством синтезатора речи. Для дублирования механизмов доставки тревожных сообщений предусматриваются еще два способа доставки сообщений.

Первый – использует специальные светозвуковые приборы устанавливаемые в помещениях, где находятся оперативные дежурные. Светозвуковой прибор – это промышленный мини-компьютер, оснащенный звуковой и световой сигнализацией, который получает извещения об опасности от сервера и непосредственно от поста наблюдения в виде SMS сообщения.

Второй резервный канал связи доставки тревог реализован непосредственно на посту наблюдения. Извещение доставляется в виде SMS сообщений ограниченному количеству абонентов.

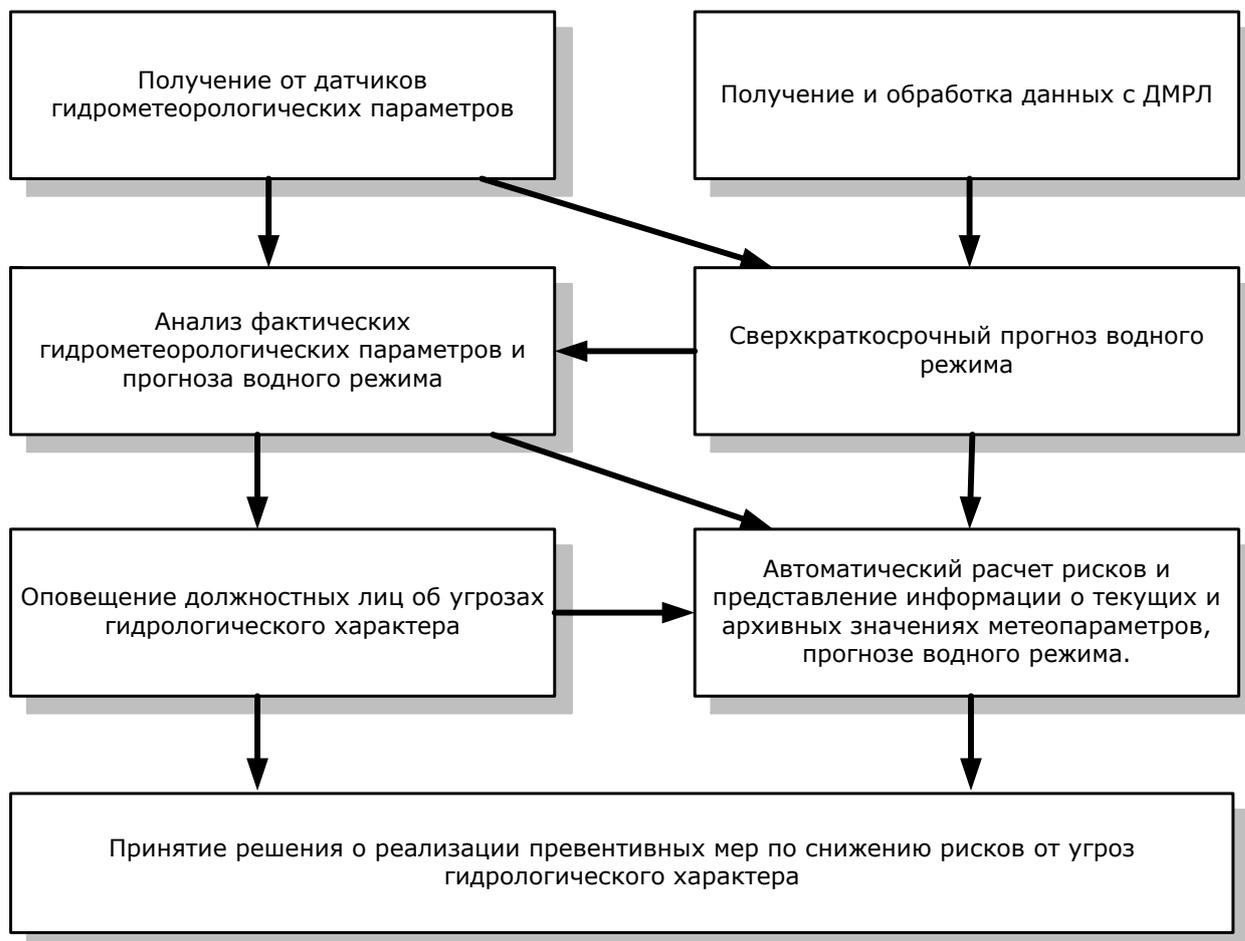


Рис.14 Функциональная схема системы сверхкраткосрочного прогнозирования угроз гидрологического характера

Основные принципы реализации системы численных моделей

Технологическая концепция, принятая при разработке комплекса моделей – разработать совокупность методов, приемов и средств, позволяющих получить максимально универсальный, недорогой, легко адаптируемый и тиражируемый программный продукт для решения определенного круга задач в области гидравлического моделирования произвольных речных бассейнов и водохозяйственных систем.

Программное обеспечение должно легко встраиваться в различные промышленные системы по обеспечению гидрологической безопасности на реках и управлению водными ресурсами (в т.ч. для гидроэнергетики, ирригации, регулирования стока и др.). Как дополнительные направления использования программного комплекса могут рассматриваться – научные исследования, выполнение проектных работ, образование.

В связи с этим установлены требования к разработке – сочетание универсальности, достаточной простоты и гибкости в использовании и настройке, устойчивость и надежность применяемых расчетных методов и моделей при вариации, как структуры рассматриваемого объекта, его протяженности, временного шага, так и его параметров.

В связи с этим разработка основывается на известных фундаментальных закономерностях гидрологии и гидравлики водных объектов, которые в ряде случаев позволяют упро-

стить структуру и уменьшить число параметров моделей без существенной потери точности в конечном результате.

Топологическая структура речного бассейна описывается с помощью ориентированного графа-дерева и представляется в виде набора отдельных элементов, существенных для построения алгоритма моделирования процессов формирования стока на водосборе, руслового добега расходов и прогнозирования уровней на нижерасположенных участках бассейна: элементарные участки водосбора, приуроченные к створам и участкам выделенной гидрографической сети; участки водотоков; гидротехнические сооружения, в том числе пруды и водохранилища, мосты, переходы, дамбы и др.

«Привязка» вершин графа-дерева осуществляется согласно разработанной схеме кодировки водных объектов и элементов на гидрографической сети, принятой в системе ведения государственного водного кадастра, с учетом фиксации местоположения вершин графа по отношению к рассматриваемому водотоку на составленной линейной схеме элементов бассейна.

Принципы выделения и описания элементарных участков системы основаны на определенных критериях и методических положениях, позволяющих получить приемлемый по точности и надежности результат при оптимальных трудовых, временных и материальных затратах, а также, впоследствии - и затратах вычислительных ресурсов при практическом использовании программного обеспечения. Эти подходы разработаны и обоснованы в процессе многолетних исследований по множеству различных водных объектов, выполненные, как самими авторами, так и известными научными учреждениями, такими как ГГИ, ИВП РАН и др.

В основе структурирования и описания элементов бассейна лежит апробированная на практике методика микромасштабного ландшафтно-гидрологического моделирования и типизации элементарных водосборов, как первичных элементов гидрографической сети (стокообразующих элементов).

Содержательный смысл данной методики заключается в выделение первичных замкнутых пространственных единиц (элементарных участков) водосбора и оценка их наиболее информативных репрезентативных параметров. Результатом данной работы является формирование представительной информационной модели водосбора и его моделирование с помощью унифицированного программного модуля.

Структурирование гидрографической сети предусматривает выделение расчетных участков и створов, что определяется топологией гидрографической сети и предварительно выполненным описанием водосбора, а также изменчивостью параметров геометрии русла и поймы, гидравлических и морфометрических характеристик, схемой и расположением притоков различного порядка, наличием гидротехнических сооружений, средств наблюдения (АГК), расположением других важных объектов.

При формализации задачи гидродинамического моделирования выделенные участки водотоков в случае целесообразности детализируются до более мелких расчетных элементов водосбора и участков водотоков при наличии уточняющей информации для получения более надежных результатов.

Схема структурного моделирования стокообразующих элементов речного бассейна участков водосбора и речной гидрографической сети показана на рис. 15 на примере информационно-топологической модели р. Убин в Краснодарском крае.

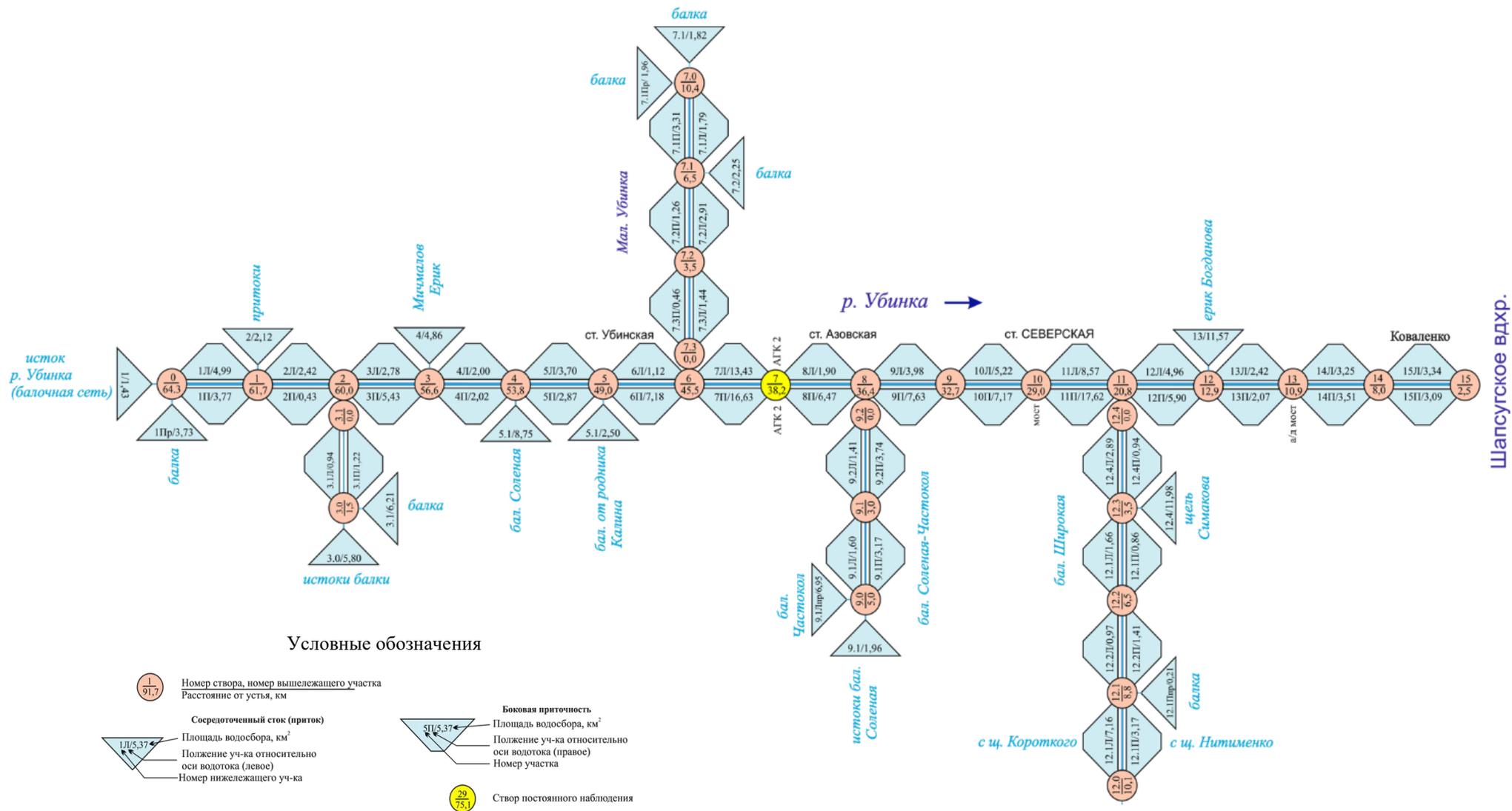


Рис. 15. Информационно-топологическая схема бассейна р. Убин (Краснодарский край) в гидродинамической модели водного объекта (для примера)

Моделирование системы осуществляется на уровне выделенных элементов с помощью типовых модулей, которые увязываются между собой на основе составленной информационно-топологической модели водосбора.

Для описания процессов инфильтрации и движения влаги в почвенном горизонте использованы широко известные в почвенной гидравлике уравнения просачивания, фильтрации и движения влаги в пористой среде. Основными факторами рассмотренных моделей является тип почв, механический состав почвогрунтов, характер подстилающей поверхности. На основе справочных данных определены параметры пористости, наименьшей влагоемкости, коэффициенты скорости впитывания и фильтрации в зоне аэрации в насыщенном и ненасыщенном влагой почвогрунте.

С учетом текущей информации о значениях влажности почвенного покрова в верхнем почвенном горизонте, осадках и испарении (транспирации) рассчитывается баланс почвенной влаги, водоотдача водосбора в виде двух составляющих: слой поверхностного и слой подпочвенного контактного стока на элементарной площадке, а также потери на испарение, дополнительное увлажнение почвогрунтов и фильтрацию в зону аэрации.

Моделирование динамики поверхностного стока в русловую сеть (кинематико-волновая модель стока с водосбора: модель «поверхностный сток») осуществляется на основе схемы, так называемой модели кинематического каскада с учетом ключевых (стокоопределяющих) показателей водоотдачи водосбора. Интегрирование уравнений кинематической волны осуществляется на основе модифицированной трехточечной неявной схемы для водосбора.

Для моделирования динамики подпочвенного (контактного) стока и его разгрузки в русловую сеть используется такая же схема кинематического каскада, но с отличной от предыдущего случая моделью расчета движения жидкости, учитывая наличие пористой среды и пограничного слоя.

Моделирование динамики поверхностного стока по участкам русловой сети (модель «русловая динамика») осуществляется на основе уравнений кинематической волны в разрезе выделенных расчетных участков с начальными и граничными условиями. Интегрирование уравнений кинематической волны осуществляется на основе трехточечной неявной схемы для участка русла. Для ее реализации в модели разработан специальный (унифицированный) метод параметрического описания геометрии русла (включая пойменные участки), что позволяет на основе небольшого числа численных характеристик моделировать русловые гидравлические и морфометрические связи с использованием кусочно-гладких кривых (сплайнов).

Параметры численных моделей и входящих в них уравнений определяются на основе анализа литературных источников, проектных материалов и детальных карт местности.

Структурная схема составляющих блоков гидродинамической модели водного объекта представлена на рис.16.

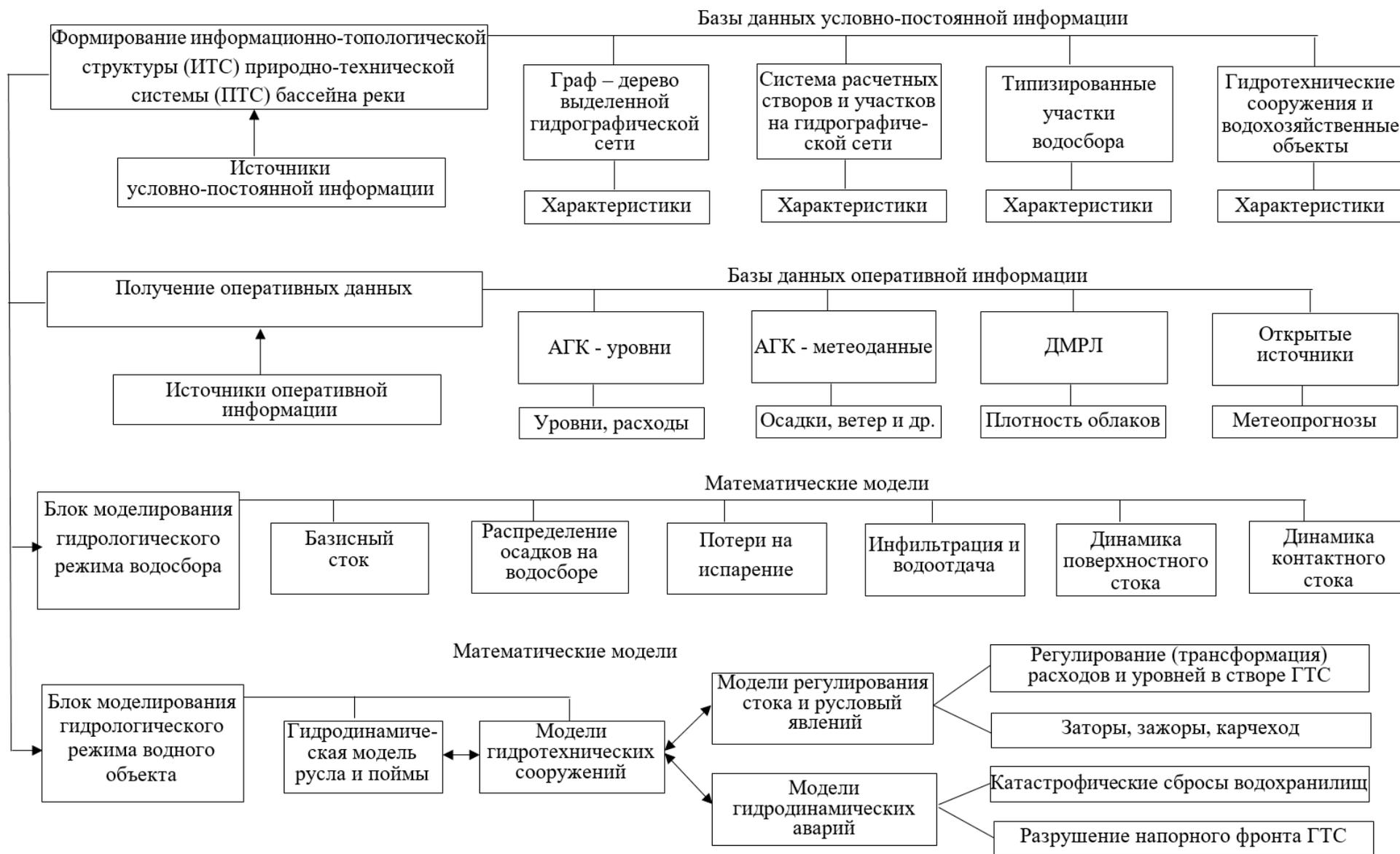


Рис. 16. Структурная схема гидродинамической модели речного бассейна

ПРЕДЛОЖЕНИЯ К ЗАДАЧАМ ПЛАНИРОВАНИЯ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ВОДОХРАНИЛИЩ

В целом, система планирования и управления водохранилищами с учетом задач регулирования стока в целях хозяйственного использования водных ресурсов и управления в экстремальных ситуациях в случае возникновения угроз гидрологического характера базируется на оценках и прогнозировании притока воды к водохранилищам, анализа водохозяйственного баланса и выработки оперативных диспетчерских правил регулирования стока.

Автоматизация планирования водных режимов производится с целью достижения максимального возможного эффекта от использования водных ресурсов и обеспечения более высокого уровня безопасности эксплуатации ГТС.

Объектом автоматизации являются процессы планирования водных режимов водохозяйственной системы в зоне влияния водохранилища на разных уровнях планирования, процессы формирования аналитической и статистической отчетности о режимах использования водных ресурсов и обеспечения требования безопасности ГТС.

Планирование режимов водопользования осуществляется на три основных горизонта: долгосрочный, среднесрочный, краткосрочный горизонты планирования и дополнительно – сверхкраткосрочный в связи с особенностями горных и предгорных водохранилищ и нахождением их в паводкоопасной зоне. Это определяет необходимость включения в контур системы управления автоматических гидрологических комплексов (АГК) для контроля в реальном масштабе времени гидрометеорологических факторов, определяющих формирование поверхностного стока в бассейнах водных объектов. Это также позволяет использовать в составе рассматриваемого компонента гидродинамических моделей для прогнозных расчетов, работающих в реальном масштабе времени. Данный компонент дает возможность повысить точность гидрологических прогнозов и, как следствие, своевременное реагирование на угрозы гидрологического характера.

Долгосрочный горизонт планирования выбирается в соответствии с годовым циклом работы водохранилища и соответствует периоду от начала каждой текущей декады до конца водохозяйственного года с минимальным шагом дискретности – одна декада.

Среднесрочный горизонт планирования соответствует периоду от одной декады до одного квартала с минимальным шагом дискретности – одни сутки.

Краткосрочный горизонт планирования соответствует периоду от суток до декады с минимальным шагом дискретности – один час (или полчаса в зависимости от технологических особенностей водохозяйственной системы).

Сверхкраткосрочный горизонт планирования соответствует периоду от одного часа до одних суток с минимальным шагом дискретности – 10 минут (в штатном режиме) или 1-5 минут в случае возникновения неблагоприятных, опасных явлений и ЧС.

Система планирования и управления водными режимами должна обеспечивать:

- автоматизированную поддержку деятельности, связанную с принятием решений при планировании режимов использования водных ресурсов;
- обеспечить гидрологическую и техническую безопасность в зоне влияния водохранилищ, в том числе создать эффективный механизм раннего предупреждения и оповещения должностных лиц, населения, служб спасения в случае угрозы ОЯ и ЧС.
- сбор, структурирование и ведение информации для анализа, формирование аналитической и статистической отчетности о водных режимах водохранилищ, использовании водных ресурсов, состоянии безопасности на водных объектах и гидротехнических сооружениях.

Схемы прогноза гидрографа и планирования водопользования на рис.17 и 18.



Рис.17 Схема прогноза гидрографа с пошаговой коррекцией

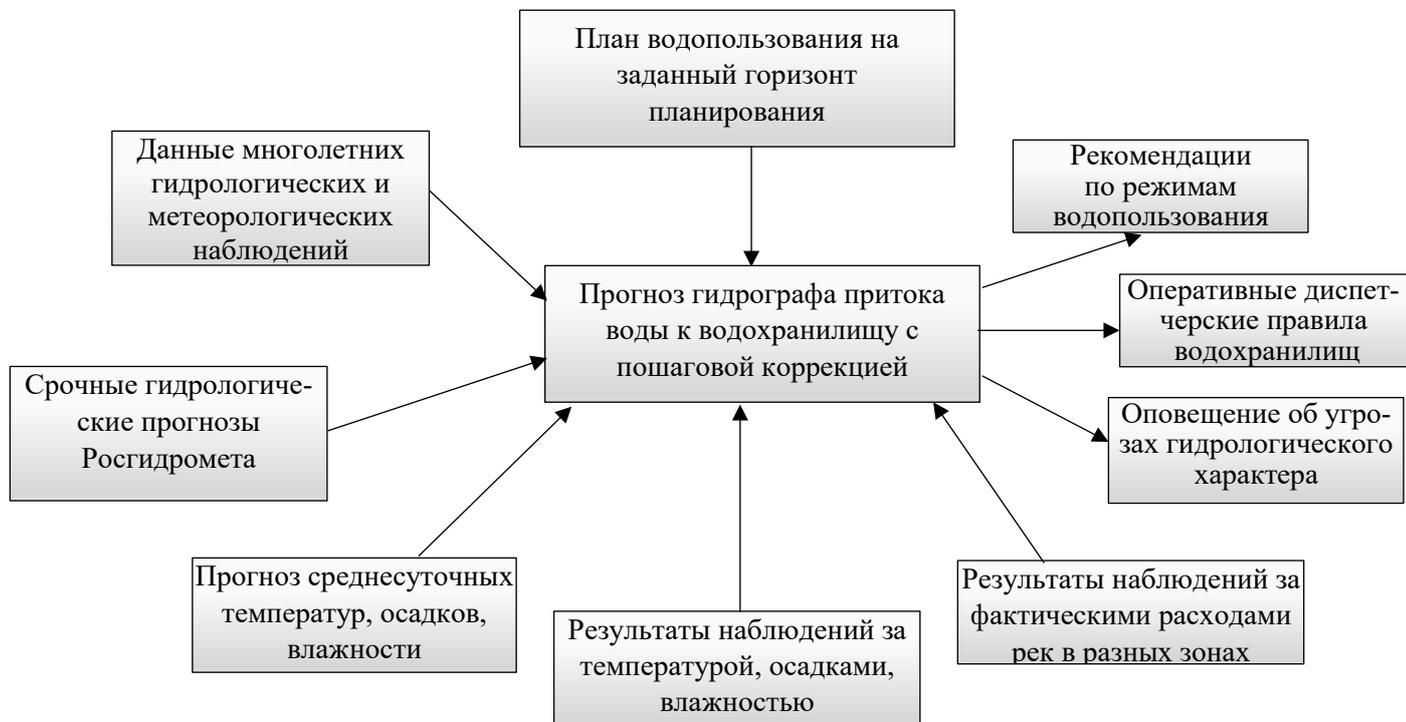


Рис. 18. Схема планирования водных режимов и формирования оперативных диспетчерских правил водохранилищ

Технология планирования водных режимов включает программные средства и модельный аппарат, позволяющие выполнить:

- аналитическую обработку поступающей информации, сравнительный и статистический анализ данных, оценку текущих режимов в соответствии с заданными критериями;
- прогноз притока к створам гидроузлов в виде гидрографов с заданной детализацией и горизонтом планирования;
- оценку риска неблагоприятных (НЯ) и опасных (ОЯ) гидрологических явлений в створах гидроузлов и участках нижнего бьефа;
- планирование водохозяйственного баланса и оперативных диспетчерских правил водохранилищ, включая режимы работы комплекса гидротехнических сооружений;
- моделирование гидрологического режима в нижних бьефах водохранилищ с оценкой риска неблагоприятных и опасных явлений;

Вся поступающая от постов наблюдения АГК и внешних источников информация анализируется сервером сбора данных (ССД) и пишется в базу данных. Полнота сбора данных от АГК обеспечивается как логикой работы АГК, так и ССД, с учетом работы резервных каналов связи и резервных ССД. Служба аналитической обработки данных, получив извещение о поступлении новой порции измерений, производит сравнение измерений с заданными критериями и осуществляет расчет прогноза расхода (уровня) воды в заданных створах. Если прогнозируемый уровень воды превышает отметки НЯ (ОЯ), то производится расчет возможной зоны подтопления и вероятностный расчет ущерба (риска). В случае обнаружения любого вида опасности, аналитическая служба извещает об этом подсистему оповещения должностных лиц.

Модельный комплекс системы планирования водопользования состоит из следующих модулей:

- модуль прогнозирования притока к створам водохранилищ на долгосрочный период планирования (горизонт прогнозирования – от начала текущей декады до конца водохозяйственного года с минимальным шагом дискретности – одна декада);
- модуль прогнозирования притока к створам водохранилищ на среднесрочный период планирования (горизонт прогнозирования – от одной декады до 1-го квартала с минимальным шагом дискретности – одни сутки);
- модуль прогнозирования притока к створам водохранилищ на краткосрочный период планирования (горизонт прогнозирования – от одних суток до 1-й декады с минимальным шагом дискретности – один час или полчаса, в случае наличия требований функционального заказчика);
- модуль прогнозирования притока к створам водохранилищ на сверхкраткосрочный период (горизонт прогнозирования – от 1-часа до 1-х суток с минимальным шагом дискретности – 10 минут – в штатном режиме или 1-5 минут в случае возникновения НЯ или ОЯ);
- модуль планирования режимов работы водохранилища на основе прогноза притока и (или) плана работы группы водопользователей водохозяйственной системы (ВХС);
- модуль прогнозирования гидрологического режима в нижних бьефах водохранилищ с оценкой риска неблагоприятных и опасных явлений.

Представленный модельный комплекс включает набор компьютерных моделей: имитационных, статистических, аналитических, оптимизационных.

В совокупности представленный модельный комплекс строится на основе комплекса имитационных моделей функционирования водохозяйственной системы.

1. Модуль прогнозирования притока на долгосрочный период планирования

Модуль предназначен для определения прогнозного притока воды к водохранилищу. Результатом работы модуля являются помесечные и подекадные гидрографы притока на долгосрочный период планирования. Осуществляется прогнозирование притока к створам гидроузлов на основе внешних данных, прогнозных элементов весенне-летнего стока и выбранных из архива прошлых лет гидрографов-аналогов. Расчётный гидрограф уточняется в режиме пошаговой коррекции по мере фактического развития гидрометеорологической обстановки по прогнозным данным и наблюдениям на АГК.

2. Модуль прогнозирования притока на среднесрочный период планирования

Модуль предназначен для определения прогнозного притока к створам гидроузлов, определённого на основе алгоритма прогнозирования притока с использованием текущих прогнозных данных и накопленных архивных данных о притоке к створам гидроузлов за предыдущие годы. Результатом является гидрограф притока к створу гидроузла на среднесрочный период планирования с посуточным шагом. Расчётный гидрограф уточняется в режиме пошаговой коррекции на основе фактического развития гидрометеорологической обстановки, наблюдениям на АГК и использования статистических моделей.

3. Модуль прогнозирования притока на краткосрочный период планирования

Модуль предназначен для определения прогнозного притока к створам гидроузлов, определённого на основе алгоритма прогнозирования притока с использованием краткосрочных прогнозных метеоданных Росгидромета и данных АГК на текущий период. Модуль строится на основе модели формирования речного стока с рассредоточенными параметрами с заданными начальными условиями, имитирующими процессы стокообразования на площади водосбора ВГУ, включая осадки, инфильтрацию, испарение, водный режим почв, формирование снежного покрова и снеготаяние, формирование поверхностного, внутриводосборного, грунтового и речного стока. Результатом является гидрограф притока к створу гидроузла на краткосрочный период планирования с часовым (получасовым) шагом. Расчётный гидрограф уточняется в режиме пошаговой коррекции по мере фактического развития гидрометеорологической обстановки и данных АГК.

4. Модуль прогнозирования притока на сверхкраткосрочный период планирования

Модуль предназначен для прогнозирования притока к створам ВГУ в случае прогноза и фактического возникновения опасных гидрологических явлений (ОГЯ) и управления в условиях ЧС. Модуль позволяет прогнозировать приток к створам ВГУ с заблаговременностью от 1-х часа до 1-х суток в режиме пошаговой коррекции на скользящем временном отрезке.

Модуль также будет использован для повышения эффективности управления водохранилищем с учётом использования оперативных данных о прогнозируемом притоке.

Модуль строится на основе автоматизированной сети гидрологических и метеорологических наблюдений (АГК) стокообразующих факторов на водосборной площади, фактических расходов в вышерасположенных створах, в том числе и смежных бассейнах и использования этих данных в гидродинамических моделях формирования стока в бассейне и руслового добега расходов к створам ВГУ. Результатом является гидрограф притока к створу гидроузла на сверхкраткосрочный период планирования с 10-ти минутным шагом (1-5 минутным при наступлении НЯ или ОЯ).

5. Модуль планирования режимов работы водохранилища и комплекса гидротехнических сооружений

Модуль предназначен для определения режимов работы водохранилищ, водозаборных и водосбросных сооружений в зависимости от прогнозируемого притока и планового режима забора воды и попусков в нижний бьеф. Задачами модуля являются:

- определение забора воды из водохранилищ для нужд водопользователей;
- определение специальных попусков и холостых сбросов в нижний бьеф (НБ) водохранилища;
- подготовка данных для расчета гидравлического режима участков нижнего бьефа гидроузла при неустановившемся режиме и пропуске экстремальных расходов.

Расчет режимов водопользования осуществляется на основе имитационных моделей водного (водохозяйственного) баланса водохранилища и гидравлики ГТС.

Результатом работы модуля являются, в зависимости от горизонта планирования и расчетного шага, детализированные гидрографы забора воды из водохранилища для подачи воды водопользователям, специальных попусков и холостых сбросов в нижний бьеф, а также расходы, уровни и возможные площади затопления (подтопления) участков НБ, в том числе в населенных пунктах.

Расчеты выполняются на скользящем временном отрезке (в режиме пошаговой коррекции) в зависимости от решаемой задачи (долгосрочного, среднесрочного, краткосрочного и сверхкраткосрочного) планирования.

Модуль предусматривает решение, как прямой, так и обратной задачи:

а) планирование «сверху» в соответствии с утвержденным планом работы водохранилища и водозаборных сооружений, определяющим необходимость обеспечить хронологически заданный гидрограф поступления воды для нужд водопользователей и организации специальных попусков из водохранилища на заданной временной развертке;

б) планирование «снизу», т.е. определение возможного забора воды и попуски в нижний бьеф, отталкиваясь от прогноза притока воды для определения оперативного диспетчерского плана работы водохранилища на предстоящий период.

Расчеты прогноза притока и режимов работы ГТС рассчитываются на каждом временном шаге для трех расчетных вариантов (сценариев) с учетом допустимой ошибки прогноза (при наличии статистической информации) с учетом вероятностного распределения ошибок прогнозных расчетов:

для расчетного ожидаемого прогнозного гидрографа,

для его верхней огибающей

нижней огибающей.

Т.е. в зависимости от решаемой задачи: оптимистичный, умеренный и пессимистичный сценарии в соответствии с водохозяйственной и гидрологической обстановкой.

б. Модуль прогнозирования гидрологического режима в нижних бьефах гидроузлов с оценкой риска неблагоприятных и опасных явлений.

Модуль предназначен для формирования краткосрочного и сверхкраткосрочного прогноза расходов, уровней воды и возможных зон затопления на участках нижних бьефов водохранилищ, а также своевременного информирования и оповещения должностных лиц, населения и сил спасения об угрозах неблагоприятных и опасных явлений.

Расчеты выполняются на краткосрочном горизонте планирования (от 1-х суток до 1 декады) с почасовым (получасовым) интервалом и на сверхкраткосрочном горизонте (от 1

часа до 1-х суток) с 10 или 1-5 минутным интервалом в зависимости от скорости изменения расходов, поступающих в нижний бьеф водохранилища, определяемых фактической или расчетной гидрологической обстановкой в верхнем бьефе гидроузла.

По результатам расчетов на каждом шаге выполняется оценка и прогноз наступления неблагоприятных и опасных гидрологических явлений в местах проживания и жизнедеятельности населения.

Задача решается на основе математических моделей гидродинамики открытого русла с распределенными параметрами с учетом начальных и граничных условий. Задание и корректировка на каждом временном шаге начальных и граничных условий осуществляется по результатам оценочных расчетов модулей 3, 4 и 5, а также оперативных данных о фактических и планируемых сбросах в нижние бьефы водохранилищ.

Расчеты выполняются в режиме скользящей коррекции по фиксируемым изменениям начальных и граничных условий с использованием результатов текущих расчетов, данных АГК в вышерасположенных створах, об изменении режима работы водохранилища.

Система моделей гидравлического режима нижнего бьефа включает несколько взаимосвязанных блоков моделей:

- а) модели поверхностного стока с участков водосбора;
- б) модели руслового добегания (кинематической волны) неустановившегося водного потока с учетом сбросов водохранилищ, бокового притока и различных факторов, влияющих на русловую динамику;
- в) модели затопления (подтопления) прилегающих участков при выходе воды на пойму;
- г) расчет индекса гидрологической опасности и вероятностного ущерба (риска).