

ВЫБОР МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ОТ НАВОДНЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНА РЕКИ КАМЫ

© 2011 г. Д.И. Перепелица^{1,2}

¹ Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь

² Камский филиал ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Пермь

Ключевые слова: наводнения, инженерные мероприятия по защите территории от затопления, комплексный подход к противопаводковым мероприятиям.



Предложен комплексный подход к разработке мероприятий по защите от наводнений, основанный на генетическом анализе неравенства, определяющем условия недопущения затопления территории. Представлена апробация данного подхода на примере двух городов в бассейне р. Камы.

Средний ежегодный ущерб от наводнений по всему миру составляет порядка 35 млрд долл., погибает более 20 тыс. чел. [1]. С учетом наметившихся тенденций к изменению климата и постепенной застройки пойменных земель, в дальнейшем можно ожидать увеличения ущерба от наводнений. Объемы средств, выделяемых для борьбы с наводнениями, ежегодно увеличиваются, но условия формирования катастрофических наводнений со временем изменяются. Русло и водосбор реки это достаточно динамичная система, не говоря уже о климатических условиях, которые также могут изменяться в широких пределах. И зачастую получается, что через определенный промежуток времени проведенные противопаводковые мероприятия уже не могут обеспечить необходимый уровень безопасности. Поэтому необходимо использовать комплексный подход при разработке и проведении противопаводковых мероприятий.

Целью работы является проработка метода выбора и оптимизации мероприятий для защиты территории от наводнений предложенного в [2] и апробирование этого подхода на фактических примерах.



В общем случае мероприятия по защите территории от наводнений можно разделить на административные, экономические и инженерные. В данной работе рассмотрены инженерные мероприятия.

Инженерные мероприятия базируются на создании технических сооружений или проведении разнообразных мероприятий. Инженерные мероприятия могут быть представлены в виде следующей схемы (рис. 1) [2].

Любой комплекс инженерных мероприятий по предотвращению затопления объектов сводится, в конечном счете, к обеспечению с заданной степенью надежности выполнения неравенства в условиях установившегося равномерного потока [2]:

$$h_{\text{общ}} = h_{\text{г_абс}} + h_{\text{дам}} - h_{\text{дно_абс}} - \left(\frac{Q_p n}{\sqrt{i}} \right)^{\frac{i}{(5/3+\gamma)}} > 0, \quad (1)$$

где $h_{\text{г_абс}}$ — абсолютные планировочные отметки защищаемых объектов;

$h_{\text{дам}}$ — высота ограждающих защитных дамб;

$Q_{p\%}$ — расход расчетной обеспеченности p ;

i — уклон водной поверхности реки в период пропуска расходов Q_p %;
 n — эффективный коэффициент шероховатости русла;
 γ — морфометрический коэффициент зависимости $F(h) = F_0 h^{(\gamma+1)}$
(F_0 — морфометрический параметр русла, при $\gamma = 0$ $F_0 = B$ — ширина потока, $F(h)$ — площадь поперечного сечения русла при заданной глубине, h — средняя глубина русла).

Данное неравенство позволяет на генетической основе проанализировать вклад возможных противопаводковых мероприятий, изменяя следующие составляющие уравнения:

- 1) перенос защищаемых объектов на возвышенные участки местности или подсыпка территории (повышение $h_{г_абс}$);
- 2) строительство или наращивание ограждающих дамб (увеличение $h_{дам}$);
- 3) проведение дноуглубительных работ (уменьшение $h_{дно_абс}$);
- 4) снижение максимальных расходов за счет регулирования стока водохранилищами, прудами или мероприятиями на водосборе (изменение Q_p %);
- 5) расчистка русла (снижение n , увеличение $F(h)$);
- 6) спрямление русла (увеличение уклона I и изменение других параметров русла).

Как следует из соотношения (1) и проведенного выше анализа, имеется в общем случае шесть управляющих параметров. При этом необходимо учитывать, что часть управляющих параметров не только статистически, но и функционально связана между собой.

В целом, задача эффективного выбора противопаводковых мероприятий сводится к установлению таких значений управляющих параметров ($\Delta h_{г}$, $\Delta h_{дам}$, $\Delta h_{дно}$, ΔQ_p , Δn , Δi), при которых суммарные приведенные затраты (целевая функция) принимает минимальные значения

$$S_{sum} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где S_1, \dots, S_6 — функции приведенных затрат в зависимости от перечисленных управляющих параметров.

Для решения поставленной задачи должны быть заданы уравнения связи (известные гидравлические и морфометрические зависимости), а также ограничения — допустимые пределы варьирования управляющих параметров и неравенство, вытекающее из условия (1):

$$\left((h_{г_абс} + \Delta h_{г}) + (h_{дам_абс} + \Delta h_{дам}) \right) \geq (h_{дно_абс} - \Delta h_{дно}) +$$

$$+ \left(\frac{(Q_p - \Delta Q_p)(n_p - \Delta n_p)}{(i + \Delta i)^{1/2}} \right)^{\frac{1}{5/3+\gamma}}. \quad (3)$$

При решении практических задач принципиальное значение имеет выбор такого комплекса противопаводковых мероприятий, который обладал бы, при обеспечении одинаковой надежности выполнения неравенства (1), минимальными приведенными затратами (2).

В результате решения оптимизационной задачи получаются конкретные значения управляющих параметров, при которых обеспечивается минимизация ущербов и приведенных затрат на проведение противопаводковых мероприятий.

Данная задача может быть решена также и без использования неравенства (1), путем введения ограничений на проведение противопаводковых мероприятий, обусловленных местными условиями.

Эффективное использование предложенного метода может быть осуществлено лишь на основании данных о затоплении рассматриваемой территории и величине ущерба. Эти данные можно получить, используя цифровые гидродинамические модели.

Для апробации предложенного метода использовались 2 территории, испытывающие постоянную угрозу затопления.

Решение проблемы наводнений в г. Кунгуре

Город Кунгур возник в XVII в. в месте слияния р. Сылвы и трех крупных ее притоков [3]. Гидрологическая ситуация в районе г. Кунгура является очень сложной: на территории города в р. Сылву впадает два притока (Ирень и Шаква), а в 4,5 км ниже города — р. Бабка (рис. 2).

Для анализа исходной гидрологической информации были использованы данные по уровням и расходам воды по постам Росгидромета р. Сылва — с. Подкаменное, р. Ирень — д. Шубино, р. Бабка — д. Балалы, р. Сылва — с. Суксун, р. Барда — д. Синюшата. Кроме того, были использованы данные по максимальным уровням воды в период половодья по ведомственным постам, находящимся в черте г. Кунгура: р. Сылва — мост, р. Ирень — мост, р. Сылва — Кунгурская ледяная пещера (КЛП).

Фактические максимальные уровни половодья равны: 120,1 м абс для поста р. Ирень — мост и 119,8 м абс для поста р. Сылва — мост, которые заметно ниже, чем расчетные уровни 1 % обеспеченности, полученные на основе линейной экстраполяции кривых распределения, составляющие: р. Сылва — мост — 120,9 м абс, р. Сылва — КЛП — 121,05 м абс и



Рис. 2. Расположение водомерных постов в районе г. Кунгура.

р. Ирень — мост — 121,1 м абс. Следовательно, принятая отметка (120 м абс [4]), на которую выводятся все дамбы в г. Кунгуре, является заниженной. Кроме того, малые перепады 1 % уровней воды на различных постах (перепад уровня не более чем 15 см), расположенных на расстоянии нескольких километров, свидетельствуют, что наиболее катастрофические наводнения в г. Кунгуре наблюдаются при наложении пиков половодий на реках Сылве и Ирени.

В настоящее время г. Кунгур от затопления защищают 30 км дамб обвалования, гребни которых выведены на отметку 120,0 м абс. Отметка гребня дамб, согласно СНиП 2.06.04—82, должна составлять 124,0 м абс. Исходя из современных условий, поднятие дамб в г. Кунгуре на необхо-

димую высоту невозможно, т. к. жилые строения и частные участки примыкают непосредственно к телу дамб. Кроме того, подъем гребня на такую высоту приведет к необходимости полной перестройки дамб. Также невозможно проводить мероприятия по подъему отметок строений, т. к. территория уже застроена. Применение крупных противопаводковых водохранилищ сопряжено с большими потерями сельскохозяйственных земель, кроме того местность сильно закарстована и создание водохранилища приведет к активизации карстовых процессов. Из возможных инженерных мероприятий остаются только действия на водосборе и дноуглубление.

В настоящее время летом р. Сылва в черте г. Кунгура мелеет. Берега рек (в т. ч. и откосы дамб) сильно заросли древесной и кустарниковой растительностью, что также снижает пропускную способность русла в период половодья и способствует увеличению максимального уровня воды.

Выбор оптимального варианта проведения руслорегулирующих работ проводится исходя из следующих критериев:

- обеспечение требуемого снижения (просадки) уровня воды при прохождении экстремально высоких паводков;
- стабилизация русла и уменьшение переработки берегов;
- восстановление судоходства по р. Сылве до г. Кунгура;
- минимум неблагоприятных экологических последствий.

При этом должны учитываться как условия технической реализуемости рассматриваемых мероприятий, так и их экономическая обоснованность.

Для выбора оптимального решения по снижению уровней воды в период половодья в черте г. Кунгура при помощи программного комплекса HEC-RAS v4.0 была создана имитационная гидродинамическая модель. В качестве исходных данных в ней использовались:

- морфометрические характеристики русел рек Сылвы, Ирени, Шаквы, Бабки на исследуемом участке, полученные на основе выполненных батиметрических съемок;
- рельеф береговой полосы, снятый с крупномасштабных топографических карт;
- морфометрические характеристики дамб;
- схема проведения руслоспрямительных и руслоуглубительных работ;
- максимальные значения расхода (1 % обеспеченности) весенних паводков.

Для верификации полученной модели использовались фактические данные за 1987 г. (половодье близкое к 5 % обеспеченности) по уровню воды, снятые в черте г. Кунгура. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Данные верификации модели

Данные верификации	Гидрологический пост		
	р. Сылва — мост	р. Ирень — мост	р. Сылва — КЛП
Фактические данные, м абс	119,57	119,77	120,34
Расчетные данные, м абс	119,38	119,59	120,22
Невязка, м	0,19	0,18	0,12

Как видно из табл. 1, расчетные характеристики отличаются от наблюдаемых не более чем на 20 см, что является достаточно хорошим результатом, следовательно, модель может быть использована для работы.

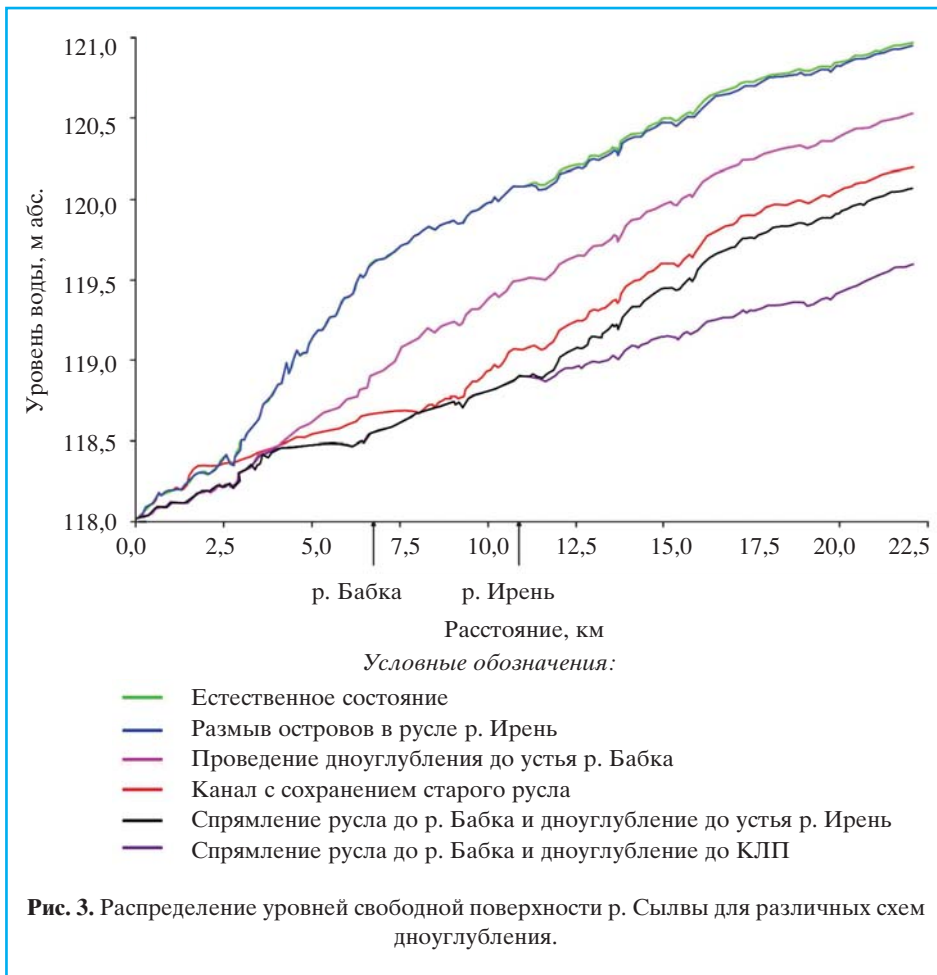
При анализе возможных вариантов проведения противопаводковых мероприятий использовались гидрологические данные, соответствующие половодью 1 % обеспеченности. В качестве граничного принимался максимальный рассчитанный уровень воды половодья 1 % обеспеченности по посту р. Сылва — с. Подкаменное, составляющий 118,02 м абс. В процессе проведения работы был вычислен ущерб при половодье 1 % обеспеченности — 4,1 млрд руб. в ценах 2011 г.

Всего при моделировании рассматривалось 6 вариантов прохождения половодья:

- при естественном состоянии русла;
- при углублении русла р. Сылвы (в среднем на 1 м) от с. Подкаменного до устья р. Бабки;
- при спрямлении русла р. Сылвы (срезка 3-х побочней) на участке от с. Подкаменного до устья р. Бабки и углубление русла от устья р. Бабки до устья р. Ирени;
- при спрямлении русла р. Сылвы (срезка 3-х побочней) на участке от с. Подкаменного до устья р. Бабки и углубление русла от устья р. Бабки до КЛП;
- создание канала, параллельного руслу р. Сылвы, от устья р. Ирени до с. Подкаменного;
- размыв острова в районе устья р. Ирени.

Динамика уровней воды по длине показана на рис. 3. При естественном состоянии русла при прохождении экстремально высоких паводков уровень воды в районе устья р. Ирени достигает отметки 120 м абс, а в центре г. Кунгура в районе автомобильного моста превышает 120,5 м абс.

Углубление русла р. Сылвы до устья р. Бабки, как следует из рис. 3, обеспечит «просадку» уровня р. Сылвы в районе устья р. Ирени на ~0,5 м (вариант 3). Проведение соответствующих руслорегулирующих



работ на р. Сылве непосредственно до района КЛП (вариант 4) приведет к «просадке» уровня воды на ~1,5 м.

Проведение дноуглубительных работ по варианту 3 будет стоить порядка 40 млн руб., варианту 4 — более 100 млн руб.

Для проведения мероприятий по задержанию стока можно использовать сеть прудов, но для снижения уровня воды в черте г. Кунгура на 1 м необходимо аккумулировать более 0,7 км³, объем имеющихся прудов составляет 0,036 км³. Соответственно, необходимо создание еще сети прудов с полезным объемом 0,66 км³. При учете, что строительство одного пруда объемом 0,0005 км³ стоит не менее 10 млн руб., общая сумма затрат составит более 140 млрд руб. Это превышает даже объем ущерба от затопления. Единственным эффективным средством защиты является проведение дноуглубления в русле р. Сылвы.

Решение проблемы наводнений в среднем течении реки Белой

Города Салават, Ишимбай, Стерлитамак, расположенные в среднем течении р. Белой, постоянно испытывают угрозу затопления. Для реки характерна резкая неоднородность стока по сезонам, т. к. водосбор очень неоднороден (левобережные притоки равнинные, правобережные притоки и сама р. Белая — горные). Для решения проблемы наводнений было создано два достаточно крупных водохранилища в горной части водосбора: Нугушское и Юмагузинское. Кроме противопаводковых задач эти водохранилища поддерживают необходимый уровень воды для работы водозаборов на нижележащем по течению участке и производят выработку электроэнергии. Но проблема наводнений не была снята полностью. Емкости построенных водохранилищ недостаточно для полной аккумуляции весеннего стока. Значительной сложностью является также достаточная удаленность водохранилищ от защищаемых городов и большая боковая приточность (рис. 4).

Для выбора оптимальных противопаводковых мероприятий была построена имитационная гидродинамическая модель. В качестве исходных данных использовались:

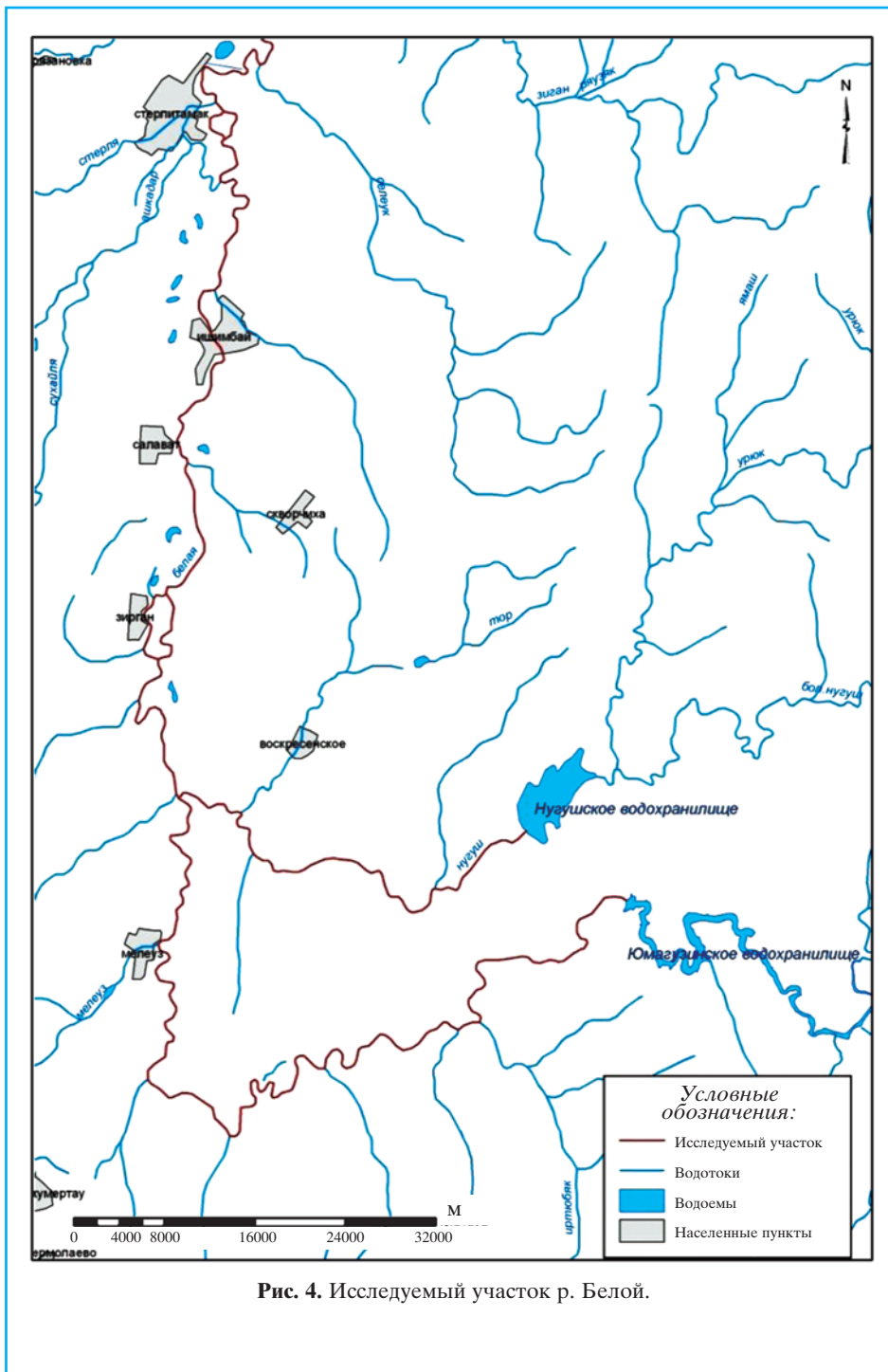
- рельеф местности в долине р. Белой, снятый с крупномасштабных карт;
- рельеф дна на изучаемом участке рек Белой и Нугуш по материалам батиметрической съемки в августе 2007 г.;
- данные по расходам воды в створах Нугушской и Юмагузинской ГЭС и боковой приточности.

Расчеты максимальных расходов воды в период половодья проводились согласно методике для неизученных рек, предложенной в СП 33-101—2003. Реки с водосборной площадью более 100 км² рассчитывались отдельно, остальные площади суммировались и расчеты проводились при помощи осредненных характеристик.

При расчете расходов воды 1 % половодья за основу была принята модель 1990 г. (рис. 5), как наиболее неблагоприятный вариант прохождения половодья (однопиковое с ярко выраженным максимумом). Для половодья 5 % обеспеченности использовались данные за 1947 г., 10 % — 1987 г., 25 % — 1959 г.

Для верификации созданной гидродинамической модели р. Белой были использованы фактические данные. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, расхождение между наблюдаемыми данными и рассчитанными на основе гидродинамической модели составляет менее



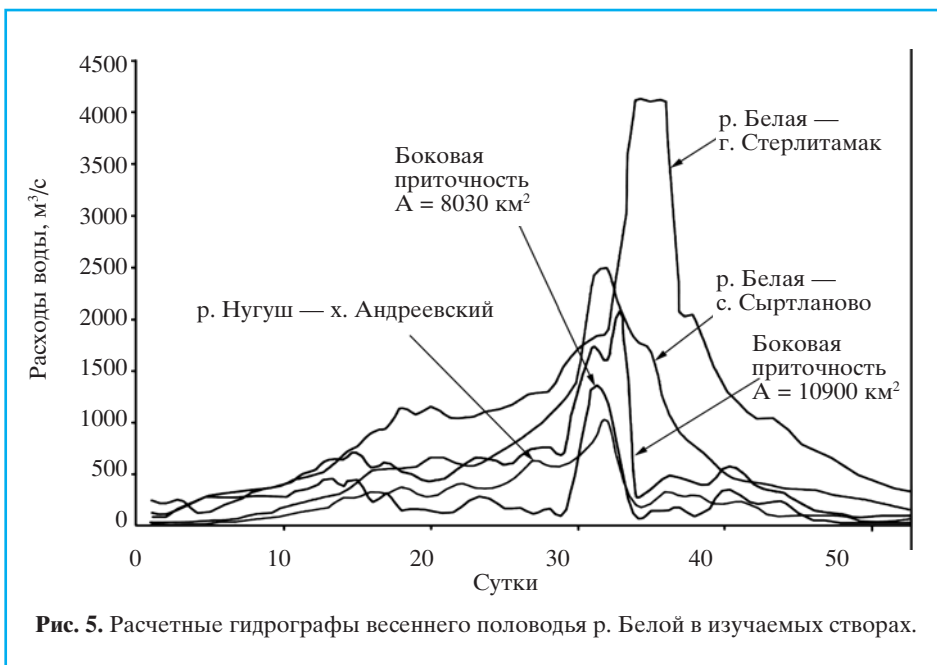


Рис. 5. Расчетные гидрографы весеннего половодья р. Белой в изучаемых створах.

35 см, что является удовлетворительным результатом при таком масштабе модели.

При моделировании прохождения половодья 1 % обеспеченности кроме расчетных гидрографов (см. рис. 5) в створе р. Белая — г. Стерлитамак, р. Белая — с. Сыртланово, р. Нугуш — х. Андреевский использовались фактические и расчетные данные и пороговое значение максимального расхода воды в период половодья в черте г. Стерлитамака, равное 2200 м³/с (отметка затопления города [5]).

Расходы воды выше 2200 м³/с наблюдаются в створе р. Белая — г. Стерлитамак в течение 4-х дней (с 2 по 5 мая включительно). Соответственно, учитывая, что боковая приточность принята равной 1400 м³/с, то через Юмагузинский и Нугушский гидроузлы лимит на сброс воды

Таблица 2. Верификация модели по гидропосту на р. Белой в г. Стерлитамаке

Обеспеченность, %	Расход воды, м ³ /с	Расчитанный уровень воды, м абс	Наблюденный уровень воды, м абс	Невязка, м
5	4250	128,24	128,52	-0,28
10	3643	127,91	127,96	-0,05
25	2760	127,34	126,99	0,35

составляет порядка $800 \text{ м}^3/\text{с}$, следовательно, в течение 6-х дней (с учетом добегаания) Юмагузинское водохранилище должно аккумулировать $0,550 \text{ км}^3$ воды, а Нугушское — $0,250 \text{ км}^3$. Следует учитывать, что полезные объемы воды для этих гидроузлов составляют — $0,279 \text{ км}^3$ ($0,504 \text{ км}^3$ при достижении форсированного горизонта) и $0,356 \text{ км}^3$, соответственно.

При сравнении этих двух показателей видно, что Юмагузинское водохранилище не сможет справиться с поставленной задачей. Для обеспечения безаварийного пропуска половодья 1 % обеспеченности необходимо:

— Увеличить эффективную емкость Юмагузинского водохранилища до величины как минимум $0,60 \text{ км}^3$ (путем изменения регламента работы водохранилища, т. к. первоначально водохранилище проектировалось на значительно большие аккумулирующие объемы).

— Разработать мероприятия по снижению боковой приточности на рассматриваемом участке. Одним из наиболее действенных вариантов является создание (и реконструкция уже имеющейся) сети прудов. Особенностью рассматриваемого участка р. Белой, как уже отмечалось ранее, является наличие большого числа малых боковых притоков площадью водосбора менее 500 км^2 . Для «облегчения» работы ГЭС необходимо снизить расходы по боковым притокам и аккумулировать в течение 2-х суток более 86 млн м^3 . При учете, что строительство одного пруда объемом $0,5 \text{ млн м}^3$ стоит не менее 10 млн руб, соответственно, общая сумма затрат составит более 1,72 млрд руб. Следует учесть, что рассматриваемая территория сильно расчленена и создание прудов не приведет к большим затоплениям сельскохозяйственных угодий. Предотвращенный ущерб от затопления составит более 3,8 млрд руб., создание сети прудов приведет к тому что ГЭС смогут работать в более благоприятных условиях и, соответственно, будет получен доход в виде выработки дополнительной электроэнергии. Следовательно, использование сети прудов при рассмотренных условиях целесообразно. Для упрощения координации действий проще использовать крупные пруды, объемом 1 млн м^3 и более.

Выводы

Для планирования противопаводковых мероприятий целесообразно использовать комплексный метод, заключающийся в выборе таких мер (или их комплекса), при которых функция суммарных приведенных затрат принимает минимальные значения и обеспечивается выполнение условия (3).

Однако в отдельных случаях достаточно произвести сравнение только альтернативных вариантов с использованием расчетов предотвращаемого ущерба. Например, для защиты г. Кунгура наиболее эффективным является дноуглубление (стоимость — 40 млн руб.), в то время как регулирование стока посредством прудов обойдется в более 140 млрд руб. В г. Салавате необходимо увеличить емкость существующих водохранилищ и создать систему прудов общим объемом 86 млн м³. Стоимость проведения мероприятий составит 1,72 млрд руб. при предотвращенном ущербе более 3,8 млрд руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авакян А.Б. Наводнения в прошлом, настоящем и будущем. Концепция защиты // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2001. 10. С. 43—49.
2. Лепихин А.П., Перепелица Д.И. К проблеме планирования мероприятий по защите территории от наводнений // 7-ой Международный конгресс «Вода: экология и технология». ЭКВАТЭК-2006 г. Москва. 30 мая — 2 июня. Сборник докладов Ч-1. С. 363—364.
3. Ежов Ю.Л., Дорофеев Е.П., Лукин В.С. Наводнения в районе города Кунгура (их причины, динамика, прогнозирование и меры борьбы с ними). Свердловск: УрО АН СССР, 1990. стр. 86.
4. Инструкция по эксплуатации защитных дамб в г. Кунгуре. Пермь, 1996.
5. Бондаренко В.Л., Белоконов Е.Н., Мордвинцев М.М., Косиченко Ю.М. Прогноз деформаций русла реки Белой в нижнем бьефе Юмагузинского гидроузла до города Стерлитамак в Республике Башкортостан. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2004. № 3. С. 75—79.

Сведения об авторе:

Перепелица Дмитрий Ильич, младший научный сотрудник, Горный институт Уральского отделения РАН, г. Пермь, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а; Камский филиал ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (КамНИИВХ), 614007, г. Пермь, ул. Народовольческая, 33; e-mail: perpelitsa_di@mail.ru