

УДК 556.16

## Прогнозирование основных элементов весеннего стока в рамках реализации системы мониторинга и прогнозирования половодья

ISSN 1996-8493

© Технологии гражданской безопасности, 2012

М.В. Кумани, А.В. Апухтин

### Аннотация

В работе предлагаются расчетные формулы и зависимости для определения основных элементов максимального стока по сложившимся на территории стокоформирующим факторам в составе многоуровневой системы мониторинга и прогнозирования опасных разливов на реках, характерных для периода половодья.

**Ключевые слова:** половодье; максимальный сток; объем стока; максимальный расход и уровень воды; потери талых вод, стокоформирующие факторы.

## Forecasting of Spring Drain Basic Elements Within the Limits of Realization of Monitoring System and High Water Forecasting

ISSN 1996-8493

© Civil Security Technology, 2012

M. Kumani, A. Apuhtin

### Abstract

The formulas and dependences for definition of maximum drain basic elements on factors of drain formation, which are developed on territory as a part of multilevel system of monitoring and forecasting of dangerous floods on the rivers, characteristic for the high water period are offered.

**Key words:** high water; the maximum drain; drain volume; water peak discharge and water line; losses of thawed snow; factors of drain formation.

## Введение

Прогнозирование возможности возникновения опасных разливов на реках является задачей, актуальность которой обусловлена состоянием современных хозяйственных систем, их уязвимостью. В зонах, подверженных негативному влиянию паводковых явлений и половодий, находится большое количество населенных пунктов, потенциально опасных и критически важных промышленных объектов, объектов инфраструктуры и сельскохозяйственных угодий. Прогноз опасных явлений, связанных с резким подъемом уровня реки и затоплением, разрушением хозяйственных объектов, является достаточно сложной, многоуровневой задачей.

Как отмечают Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И., в области эффективного обеспечения готовности и осуществления превентивных мер одним из наиболее действенных средств для снижения ущерба является хорошо функционирующая система раннего предупреждения. [3]

В связи с этим, возникает необходимость создания комплексной многоуровневой системы мониторинга и прогнозирования опасных разливов на реках и внутренних водоемах.

## Определение основных этапов мониторинга и прогнозирования половодья

Система мониторинга паводков и половодий, способная эффективно оценивать риск опасных гидрологических явлений, их характеристики, время проявления и потенциальный ущерб, по нашему мнению, должна включать следующие обязательные элементы:

1. Расчет риска развития опасных явлений различного генезиса. Данные мероприятия включают в себя гидрометеорологическую характеристику территории, на основе которой делается вывод о генезисе возможных опасных подъемов уровня, определяющих их факторов, их сочетании и возможном взаимодействии. По статистическим данным (в случае их наличия) проводится анализ риска развития данных явлений, включающий построение кривых обеспеченности максимальных уровней и расходов воды, создание картографического материала, отображающего зоны затопления территории при половодьях и паводках различной обеспеченности, а также пространственный анализ территории с выделением потенциально опасных, критически важных объектов, объектов инфраструктуры, населенных пунктов и пр., попадающих в зоны затопления различной обеспеченности.

2. Долгосрочный прогноз водности предстоящего половодья. На этом этапе оценивается риск проявления опасных разливов в конкретный год. Основными

оцениваемыми параметрами является стокоформирующие факторы, обуславливающие общие черты формирования предстоящего половодья, а именно общий запас воды в снежном покрове на водосборе и факторы, обуславливающие его потери. Для различных районов набор и комбинации значащих факторов будут различными, однако основными из них являются: общая оценка снеготаяния и осадков за период снеготаяния, их пространственное распространение, потери на инфильтрацию талых и дождевых вод в почву (оцениваются на основе характеристик глубины промерзания почвы и предвесенней увлажненности водосборов и некоторых других параметров), поверхностное задержание формами микрорельефа, а также потери на заполнение бессточных областей, потери на пополнение запасов грунтовых и болотных вод, предварительные оценки величины испарения за период половодья и некоторые другие.

3. На основе фоновой информации, полученной на 2-м этапе, проводится прогнозный заблаговременный расчет максимальных расходов и уровней, характеризующих опасность затопления территории и находящихся на ней объектов. То есть на данном этапе оценивается риск развития неблагоприятных и опасных явлений в условиях конкретного сезона.

4. Основной и наиболее ответственный этап — это краткосрочное прогнозирование развития ситуации, расчет сочетания волн половодья, времени их наступления на базе оперативной гидрометеорологической информации.

В предложенной схеме отражены 4 основных этапа оценки и прогноза риска затопления. Этапы, включают долго, средне, либо краткосрочные методы прогнозирования, каждый из которых должен отображать результаты расчета, необходимые для определения зон затопления. Оперативность прогнозов возрастает при переходе к каждому последующему этапу. Для 1—2 этапов речь идет о фоновых и предварительных прогнозах, для 3 и 4 — средне- и краткосрочные прогнозы опасности затопления. Соответственно, при реализации каждого из этапов происходит вероятностная (либо категорическая) оценка риска, служащая не только основанием для разработки и проведения превентивных мероприятий, но и основанием для дальнейшего продолжения мониторинга ситуации.

Так, если по статистическим данным установлено, что территория не подвергается воздействию опасных разливов, то и организация системы мониторинга обстановки в период половодья там не целесообразна. Если разливы воды возникают и в их зону попадают объекты, для которых существует риск разрушения, или иных опасных воздействий, тогда возникает необходимость перехода ко 2—4-м этапам.

Применение тех или иных методов и подходов к прогнозированию определяется не только и не столько их заявленным качеством. В большинстве случаев,

особенно для долго- и среднесрочных прогнозов, низкое качество прогнозов определяются не несовершенством метода или модели, а изменчивостью стокоформирующих факторов, слабо поддающихся прогнозированию. Так, например, величина осадков за период половодья практически не прогнозируется, а ее оценка дается с помощью стохастических моделей или в вероятностной форме. Помимо этого, применение сложных математических моделей, например [2, 5], даже автоматизированных, т.е. не требующих непосредственных расчетов посредством оператора или группы прогноза, ограничено. Ограничение заключается в том, что для физически обоснованных методов расчета, динамических и динамико-стохастических моделей (как правило) требуется большой объем исходной информации, не всегда имеющейся в наличии. Значительной проблемой их использования является не только ограниченность входных данных, имеющихся, в основном, только для небольшой части речной сети с достаточной для прогноза сетью гидрометеорологических станций и постов, но и качество предоставляемой информации, что является отдельной проблемой отечественной гидрологии. Таким образом, при выборе той или иной формулы расчета, математической модели стока или стокоформирующих факторов, необходимо уделять особое внимание целесообразности его использования, ведь для практики прогнозирования и оценки риска опасных разливов на реках и внутренних водоемах первоочередное значение имеет не физическая обоснованность или новизна подхода, а ее практическая применимость и требуемая достоверность результатов.

В данной работе остановимся более подробно на проблеме оценки возможности реализации опасных разливов по сложившимся стокоформирующим факторам, которая решается на 2-м и 3-м этапе предложенной нами схемы.

### Краткая характеристика условий формирования максимального стока и затопления территории г. Курска

Значительные территории города Курска расположены на пойменных землях, подверженных периодическому затоплению весенними водами. Уровненный режим во многом зависит от двух основных водотоков — притока р. Тускарь и верхнего течения р. Сейм (рис. 1).

Для прогнозирования уровня воды на данном гидрологическом посту (далее — ГП) необходимо учитывать как прохождение волны половодья по основному руслу р. Сейм, так и по р. Тускарь. Задачу получения прогноза максимальных уровней, обуславливающих затопление обширных урбанизированных территорий в г. Курске и ряде сельских поселений,

целесообразно рассматривать отдельно для р. Тускарь и верхнего течения р. Сейм до г. Курска, на основании чего будет дан прогноз максимальных уровней воды в замыкающем створе р. Сейм—пос. Рышково.

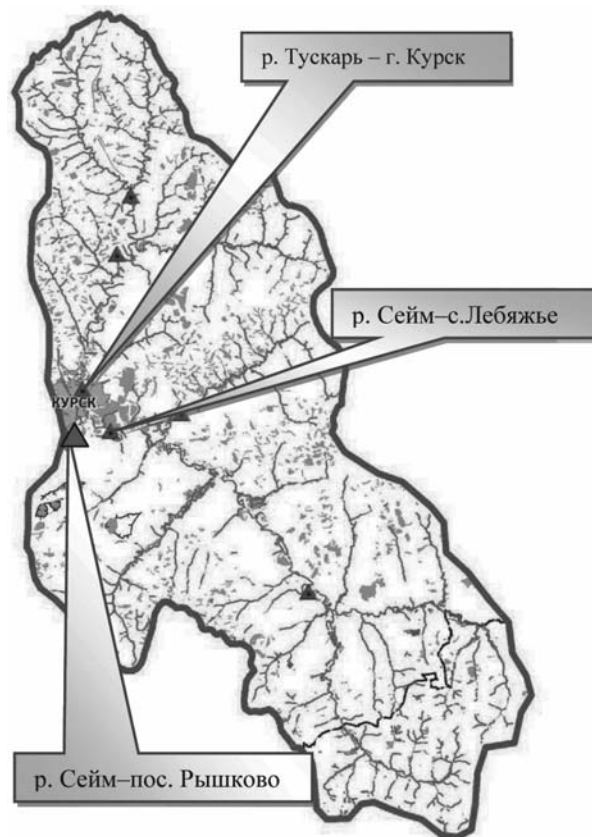


Рис. 1. Схема расположения гидрологических постов на исследуемой территории

Исследуемый нами гидрологический объект относится к рекам с преимущественно снеговым питанием. Для него характерна устойчивая межень с эпизодическими невысокими паводками. Максимальные уровни воды характерны для периода весеннего половодья.

Для исследуемого объекта характерно наличие длительных рядов наблюдений, что предопределяет выбор методов исследования, которые во многом будут основаны на статистических и физико-статистических подходах.

### Оценка водности предстоящего половодья

Получаемые на данном этапе результаты имеют, как правило, оценочный, приближенный характер. Повышение качества долгосрочных прогнозов в системе мониторинга развития половодья не играет практического значения, так как некоторые факторы, значительно влияющие на характер половодья, его высоту и как следствие риск затопления территории в настоящее время практически не поддаются долгосрочному прогнозированию. Это относится к метеорологическим факторам, в частности к количеству

осадков, выпадающих на поверхность водосбора за период половодья, и температурному режиму, характерному для предстоящей весны. Как только появится возможность надежного долгосрочного или среднесрочного прогноза режима температуры и осадков на период предстоящего снеготаяния, станет возможным существенно увеличить точность прогнозов и гидрологических процессов, весеннего половодья, его дружности, максимальных расходов и других характеристик.

Для определения оптимального набора необходимых для гидрологических прогнозов исходных данных обратимся к общим закономерностям формирования стока весеннего половодья, характерным для выбранных нами гидрологических объектов.

Запишем уравнение водного баланса следующим образом:

$$Y = S + X - P, \quad (1)$$

где  $Y$  — сток весеннего половодья,  $S$  — максимальный запас воды в снежном покрове и ледяной корке,  $X$  — сумма осадков за период снеготаяния,  $P$  — суммарные потери талых вод.

Величина суммарных потерь талых вод определяется следующим образом:

$$P = E + \Delta W + \Delta U_{zp} + \Delta U_{нов}, \quad (2)$$

где:  $E$  — испарение за период формирования талого стока;  $\Delta W$  — потери на увлажнение почвогрунтов,  $\Delta U_{zp}$  — потери талых вод на пополнение запасов грунтовых и болотных вод,  $\Delta U_{нов}$  — потери талых вод на поверхностное задержание.

В районировании равнинной части ЕТС по основным факторам, формирующим потери талых вод, проведенном Вершининой Л.К., Крестовским О.И., Калужным И.Л. и Павловым К.К., выбранные нами гидрологические объекты относятся к IV району, который занимает западную и центральную части лесостепной зоны с нормой годового стока от 5 до 1,5 л/с с 1 км<sup>2</sup>. Восточной границей его являются водоразделы рек Цны и Хопра. В этом районе изменчивость водопроницаемости почв и, соответственно, потерь талых вод, в основном, зависят от степени промерзания почвы, так как предвесенняя увлажненность почв в 90—95 % случаев (зим) близка и превышает наименьшую влагоемкость. Высокая увлажненность почв обуславливается наличием достаточно высокой влажности с осени и частыми зимними оттепелями. Поэтому основным фактором потерь талых вод является глубина промерзания почвы, а дополнительным фактором — влажность почв в годы с недостаточным их увлажнением. [1]

Потери талых вод на увлажнение почвогрунтов определяются, в основном, величинами предвесеннего увлажнения ( $W$ ) и глубины промерзания почво-

грунтов ( $L$ ). Пополнение грунтовых вод определяется водопроницаемостью грунтов, а, следовательно,  $\Delta U_{zp}$  так же можно связать с величинами  $W$  и  $L$ .

Величина потерь на поверхностное задержание относительно стабильна, т.к. определяется морфологическими особенностями ландшафта, и ее изменчивость от года к году определяется, в основном, объемом воды, поступившей на поверхность бассейна.

Потери воды на испарение примем как незначительные и мало изменяющиеся от года к году.

Дополнительным фактором, значительно влияющим на объем стока и максимальные расходы весеннего половодья на исследуемой территории, является зарегулированность стока прудами и водохранилищами, многие из которых относятся к категории сезонного регулирования. Так как активное строительство прудов и водохранилищ прекратилось к 1988 г., в качестве исходных данных для долгосрочного прогнозирования объема весеннего стока будем использовать период с 1988 по 2007 г.

Таким образом, слой стока весеннего половодья возможно рассчитать, применяя регрессионные уравнения вида

$$Y = f(S_{max}, X, P), \quad (3)$$

$$P = f(W, L), \quad (4)$$

$$Y = f(S_{max}, X, W, L). \quad (5)$$

Предикторами регрессионных уравнений выбраны:

1. Величина максимального запаса воды в снежном покрове и ледяной корке с поправкой на повышенное снегонакопление в овражно-балочной сети ( $S_{max}$ );

2. Косвенная характеристика предвесеннего увлажнения почвогрунтов ( $W$ ) (рассчитанная по методике ГМЦ);

3. Глубина промерзания почвогрунтов ( $L$ );

4. Осадки за несколько временных интервалов: от момента определения максимальных запасов воды в снеге до начала снеготаяния ( $X1$ ), от начала снеготаяния до схода снежного покрова ( $X2$ ), от схода снежного покрова до окончания половодья ( $X3$ ).

Выделение нескольких временных категорий осадков обусловлено их различной степенью участия в формировании величины слоя стока весеннего половодья. В период весеннего половодья осадки, выпадающие на территорию бассейна, в зависимости от времени их выпадения, по разному участвуют в формировании стока.

Для прогнозирования слоя стока весеннего половодья по рассматриваемым гидрологическим постам использовались среднеарифметические значения перечисленных выше величин по метеорологическим станциям, расположенным на территории выделенных бассейнов.

Проведение регрессионного анализа позволило получить следующие формулы для расчета слоя стока весеннего половодья:

для ГП р. Тускарь—г. Курск:

$$Y = 0,22 * S_{max} + 0,245 * X1 + 0,21 * X2 + 0,13 * X3 - 0,67 * L - 0,215 * W + 12,05. \quad (6)$$

$$R^2 = 0,77$$

для ГП р. Сейм—с. Лебяжье:

$$Y = 0,22 * S_{max} - 0,52 * X1 + 0,54 * X2 + 0,625 * X3 + 0,16 * W + 0,70 * L - 54,4. \quad (7)$$

$$R^2 = 0,85$$

Графическое представление связей рассчитанных и прогнозных значений слоя стока представлена на рис. 2 и 3:

В уравнениях 6 и 7 были использованы фактические значения осадков за обозначенные периоды. При составлении прогноза используется либо норма осадков за период, либо их значение по соответствующим метеорологическим прогнозам. Целесообразным видится использование для оценки количества осадков, активно участвующих в формировании весеннего стока нормы осадков  $\bar{X}$ ,  $0,5 \bar{X}$ ,  $2 \bar{X}$ , и производить последующую корректировку прогноза слоя стока половодья путем сравнения фактического количества осадков с их нормами, что было предложено Вершининой Л.К. и др. в [1]

## Расчет максимальных расходов и уровней воды

Максимальный расход воды можно выразить как функцию объема половодья, его продолжительности и геометрической формы [4]. Но в условиях, когда не известен термический характер предстоящей весны, определить форму гидрографа стока практически невозможно. Приблизительно максимальный расход воды

за период весеннего половодья можно определить по зависимости

$$Q_{max} = f(Y). \quad (8)$$

Зависимость максимальных расходов воды от слоя стока половодья для гидрологического поста в г. Курске на р. Тускарь представлена на рис. 4:

$$Q_{max} = 2,51 Y_{(р. Тускарь—г. Курск)} - 12,47. \quad (9)$$

$$R^2 = 0,8126$$

Данная зависимость должна уточняться на этапе выпуска среднесрочного прогноза, когда имеется представление о характере предстоящей весны. При затянутой весне (вариант 3 на рис. 4), когда наблюдается плавное повышение температуры воздуха, формируется более пологий гидрограф стока. В обратном случае (вариант 2 на рис. 4), когда температура воздуха резко повышается и наблюдается дружное снеготаяние, гидрограф стока имеет высокий максимум. Поэтому, осредненная зависимость (9) (для варианта 1 на рис. 4) должна уточняться при наличии прогнозных данных о температурном характере весны.

Приведем две дополнительные формулы для расчета максимального расхода от рассчитанного слоя стока весеннего половодья:

При дружном снеготаянии, резком повышении температуры

$$Q_{max(р. Тускарь—г. Курск)} = 2,7237 * Y_{(р. Тускарь—г. Курск)} - 1,0492. \quad (10)$$

$$R^2 = 0,9903$$

При затянутой весне, плавном повышении температуры

$$Q_{max(р. Тускарь—г. Курск)} = 1,2371 * Y_{(р. Тускарь—г. Курск)} - 6,4996. \quad (11)$$

$$R^2 = 0,9932$$

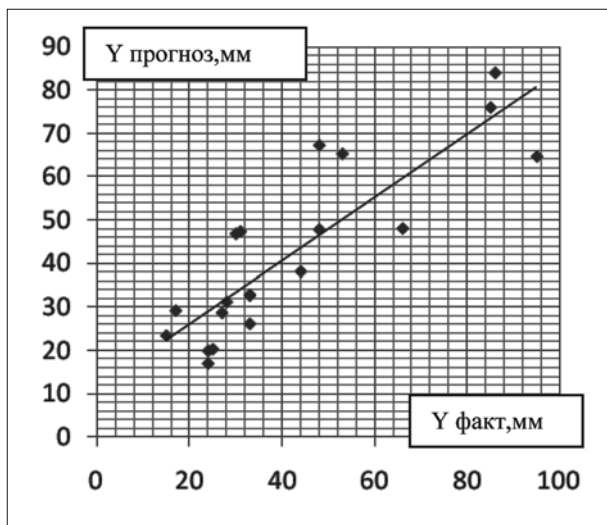


Рис. 2. Связь рассчитанных и фактических величин слоя стока весеннего половодья для ГП р. Тускарь — г. Курск

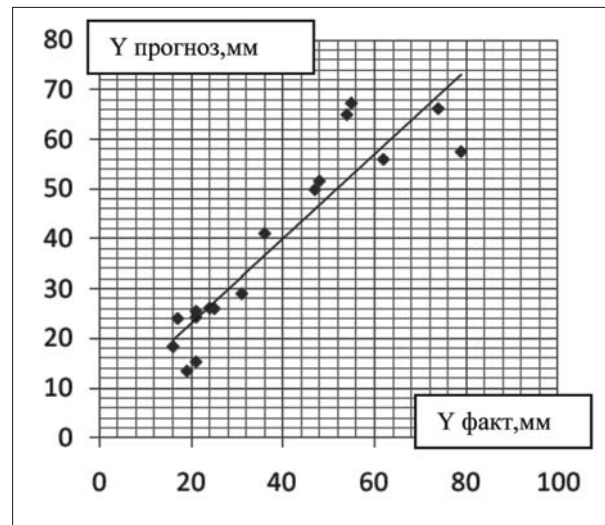


Рис. 3. Связь рассчитанных и фактических величин слоя стока весеннего половодья для ГП р. Сейм — с. Лебяжье

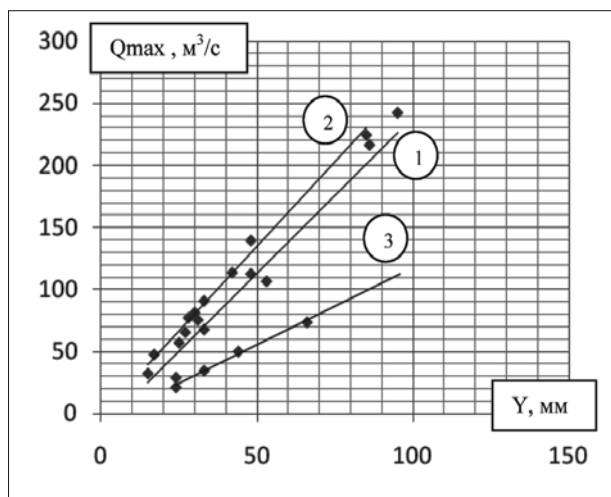


Рис. 4. Зависимость максимальных расходов от слоя стока весеннего половодья для ГП р. Тускарь—г. Курск (цифры у линий — варианты развития событий при различных термических режимах весны)

Переход от максимальных расходов к максимальным уровням осуществляется по формуле (12) или графической зависимости, представленной на рис. 5.

$$H_{(р. Тускарь—г. Курск)} = 121,08 * \ln(Q_{р. Тускарь—г. Курск}) + 3,1331. \quad (12)$$

$$R^2 = 0,9582$$

Аналогичные расчеты были проведены для ГП р. Сейм—с. Лебяжье (рис. 6 и 7).

Уравнение для определения максимального расхода по слою стока для гидрологического поста р. Сейм—с. Лебяжье имеет вид:

$$Q_{(р. Сейм—с. Лебяжье)} = 5,0613 * Y_{(р. Сейм—с. Лебяжье)} - 38,001. \quad (13)$$

$$R^2 = 0,8615$$

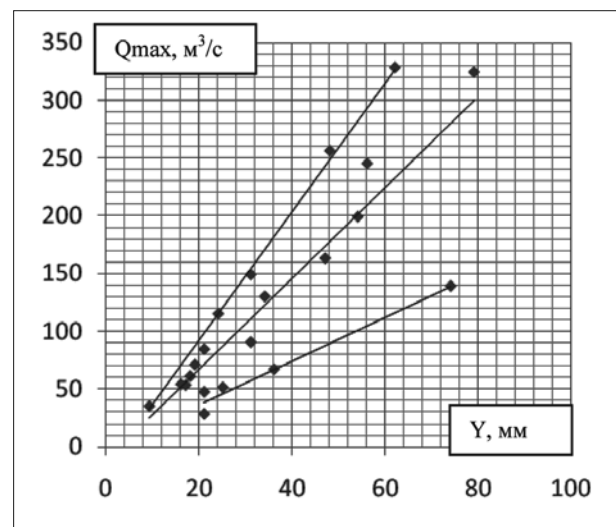


Рис. 6. Зависимость максимальных расходов от слоя стока весеннего половодья для ГП р. Сейм—с. Лебяжье

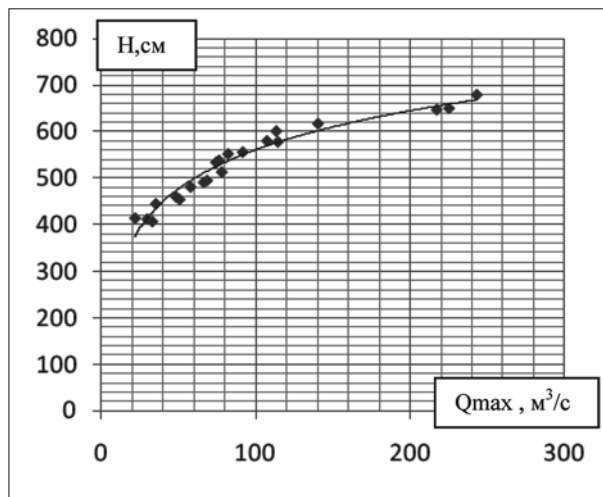


Рис. 5. Зависимость максимального уровня поста от расхода воды для ГП р. Тускарь—г. Курск

При дружном снеготаянии, резком повышении температуры

$$Q_{(р. Сейм—с. Лебяжье)} = 5,5627 * Y_{(р. Сейм—с. Лебяжье)} - 18,801. \quad (14)$$

$$R^2 = 0,9993$$

При затянутой весне, плавном повышении температуры

$$Q_{(р. Сейм—с. Лебяжье)} = 1,907 * Y_{(р. Сейм—с. Лебяжье)} - 2,0171. \quad (15)$$

$$R^2 = 0,9737$$

Уравнение для определения максимального уровня воды по максимальным расходам имеет вид:

$$H_{(р. Сейм—с. Лебяжье)} = 145,03 * \ln(Q_{(р. Сейм—с. Лебяжье)}) - 414,36. \quad (16)$$

$$R^2 = 0,9627$$

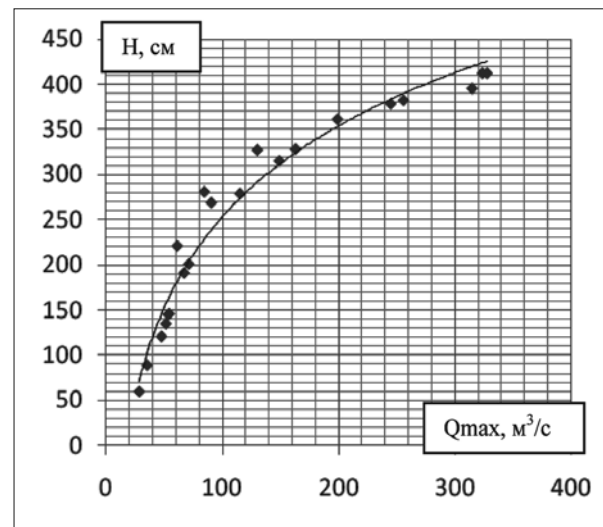


Рис. 7. Зависимость максимального уровня поста от расхода воды для ГП р. Сейм—с. Лебяжье

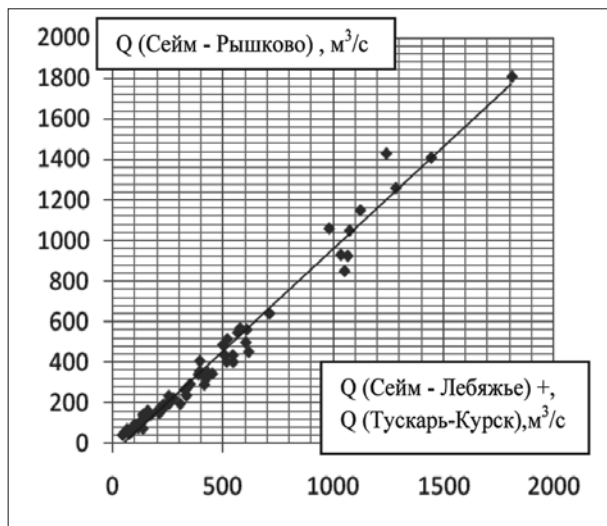


Рис. 8. Связь максимальных расходов г.п. р.Сейм - пос. Рышково и суммы расходов ГП р. Тускарь—г. Курск и р. Сейм—с. Лебяжье

Максимальные расходы воды в замыкающем створе (р. Сейм—пос. Рышково) определяются по сумме максимальных расходов, спрогнозированных по гидрологическим постам р. Сейм—с. Лебяжье и р. Тускарь—г. Курск (рис. 8) и рассчитываются как сумма расходов на вышерасположенных постах (17).

$$Q_{(p. \text{Сейм—пос. Рышково})} = Q_{(p. \text{Сейм—с. Лебяжье})} + Q_{(Tускарь—Курск)} \quad (17)$$

$$R^2 = 0,978$$

$$H_{(p. \text{Сейм—пос. Рышково})} = 120,93 * \ln(Q_{(p. \text{Сейм—пос. Рышково})}) - 303,2 \quad (18)$$

$$R^2 = 0,931$$

## Заключение

Реализация всех четырех этапов предложенной принципиальной схемы мониторинга и прогнозирования половодья позволит оптимизировать процесс подготовки к наступлению половодья, определения состава, сроков выполнения и других особенностей проведения превентивных мероприятий, а также, что особо важно, своевременно и оперативно оповещать население, экстренные и оперативные службы и другие заинтересованные субъекты о риске затопления территории.

Для решения задачи долго- и среднесрочного прогнозирования максимального стока применялись наиболее простые методы анализа и прогноза стока. Отсутствие сложных, детерминированных, динами-

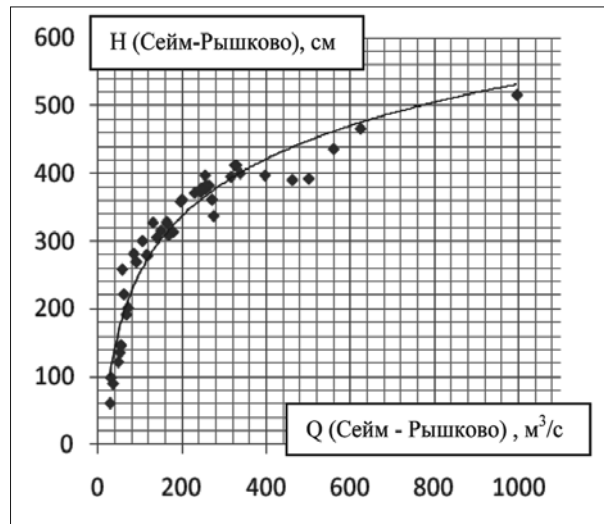


Рис. 9. Зависимость максимального уровня от расхода воды для ГП р. Сейм—пос. Рышково

ко-стохастических моделей в прогнозных схемах, возможно, способных более полно описать происходящие на водосборе процессы, результатом которых является формирование максимального стока, компенсируется минимальными затратами на эксплуатацию и создание прогнозных схем при необходимости их тиражирования на другие гидрологические объекты, простотой работы со сформированными прогнозными схемами и моделями, а также достоверностью и качеством предоставляемой прогнозной информации, которая не уступает прогнозам, получаемым при использовании сложных физически обоснованных моделей.

## Литература

1. Вершинина Л.К., Крестовский О.И., Калюжный И.Л., Павлова К.К. Оценка потерь талых вод и прогнозы объема стока половодья. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 189 с.
2. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 312 с.
3. Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Катастрофические наводнения начала XXI века. Уроки и выводы. М.: ООО «ДЭКСПРЕСС», 2003. 352 с.
4. Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 1990. 304 с.
5. Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 220 с.

## Сведения об авторах:

**Кумани Михаил Владимирович:** д. с.-х. н., проф., ФГБОУ ВПО «Курский государственный университет». 305000, Курск, ул. Радищева, д. 33. E-mail: kumanim@yandex.ru

**Апуктин Александр Валерьевич:** Центральный филиал ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), м.н.с. 305000, Курск, Можаяевская, д. 6. E-mail: apukhtin87@gmail.com