

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ Р. ЕНИСЕЙ У Г. КЫЗЫЛ

Основы метода

В основу физико-статистической модели долгосрочного прогноза максимальных уровней воды весеннего половодья положены результаты исследования, ранее полученные Л.Г. Шуляковским [1], показывающие возможность использования при решении данной задачи регрессионных моделей, учитывающих факторы, наиболее полно характеризующие условия формирования максимальных уровней воды.

Исследуемый бассейн р. Енисей представляет собой сложную систему чередующихся горных хребтов и межгорных котловин, характеризующихся большим контрастом ландшафтно-гидрологических характеристик. Климат рассматриваемой территории, находящейся в «дождевой тени» от хребтов Алтая, отличается резко выраженной континентальностью.

На Енисее и других реках изучаемой территории периодически наблюдаются наводнения, причиняющие значительные убытки экономике республики. В отдельных случаях они носят катастрофический характер. Сравнительно редко максимальные уровни воды у г. Кызыл связаны с заторами льда (в 25 % случаев). Наводнения заторного происхождения бывают в годы с неустойчивым ходом температуры воздуха в момент вскрытия Енисея. За все время инструментальных наблюдений в створе зарегистрированный максимальный уровень воды в Енисее (836 см в 1945 году) обусловлен именно заторным явлением.

Чаще всего повышенные уровни воды в Енисее формируются в результате снегодождевых паводков и наблюдаются в мае-начале июня, причем могут быть как при прохождении первой волны половодья, так и повторяющихся волн.

В первом случае половодье формируется при устойчивом юго-западном переносе воздушных масс. На высоту уровня воды влияют как зимние запасы воды в снеге, так и температура воздуха в мае.

Во втором случае максимальные отметки уровня воды Енисея обеспечены запасами воды в снеге и дождями. В горных условиях ливни, связанные с прохождением атмосферных фронтов, вызывают интенсивное таяние снежного покрова. При этом талый сток без существенных потерь на испарение и инфильтрацию попадает в русловую сеть, формируя максимум уровня воды в замыкающем створе. Площадь снегового покрытия бассейна в такой момент может составлять 10 %.

Формирование максимальных уровней весеннего половодья особенно трудно описать определенным набором факторов в горных районах, т.к. снежный покров распределен неравномерно, значима разница температур воздуха на различных высотах и зонах, дополнительно налагается дождевая составляющая притока воды. Все это в совокупности приводит к неравномерному поступлению талых вод в речную сеть. Гидрографы рек многопиковые, трудно разделяющиеся по типам питания. Особенно трудно выявить максимальный уровень весеннего половодья в годы с повышенным летним дождевым стоком.

При разработке метода прогноза максимальных уровней воды весеннего половодья сначала подбирались оптимальные уравнения регрессии для обобщенных показателей формирования таких уровней. Это линейные комбинации гидрометеорологических параметров гидросферы и атмосферы, измеряемых в пунктах наблюдений гидрометеорологической сети. К обобщенным показателям относятся:

- 1) характеристика толщины льда или ее изменения по длине участка реки;
- 2) показатель теплозапаса почвы;
- 3) показатели температуры воздуха в марте и апреле;
- 4) показатели влагообеспеченности (количество осадков) апреля или марта-апреля;
- 5) показатель снегонакопления;
- 6) характерные осенние и зимние уровни;
- 7) осенний сток.

Набор предикторов, входящих в прогностические уравнения для обобщенных показателей максимальных уровней воды, определяется из физических соображений и уточняется на основе анализа коэффициентов их корреляции с максимальными уровнями воды.

Рассмотрим используемые в прогностических уравнениях предикторы.

- Запасы воды в снеге в пунктах наблюдений характеризуют количество поступившей на водосбор талой воды.
- Температура воздуха в марте (декадная, месячная) косвенно характеризует тип весны. Например, при низкой температуре воздуха в марте более вероятны холодная

погода в первой половине апреля и последующее интенсивное потепление в конце апреля-начале мая, ускоряющее начало весеннего половодья и характеризующее его быструю течность. Теплое начало марта чаще сопровождается растянутым по времени половодьем.

- Температура почвы характеризует теплофизические процессы впитывания и повторного замерзания талой воды с возможным образованием запирающих слоев на открытых участках. Вертикальный градиент температуры в почвенном слое косвенно характеризует запас влаги в почве (чем меньше градиент, тем больше влагозапас).

- Температура воздуха в апреле характеризует интенсивность таяния снега и величину оставшегося в бассейне реки снегозапаса, переходящего на начало мая.

- Количество весенних осадков отражает дополнительное поступление воды и косвенно – влажность воздуха и потери воды на испарение.

- Осенний сток характеризует запасы влаги и льдистость почвы к моменту начала снеготаяния, либо водность реки в период замерзания и пропускную способность русла.

- Максимальная толщина льда указывает на его объем и прочность, а также предопределяет заторный характер половодья в период вскрытия реки.

- Уровень воды на дату появления ледовых образований или на дату установления ледостава, минимальный и максимальный уровни воды за зимний период, а также превышение максимального уровня над уровнем воды на момент установления ледостава – отражают ледовые условия, наличие зажоров льда в зимний период и пропускную способность русла.

Итак, линейные комбинации перечисленных предикторов отражают обобщенные показатели максимальных уровней воды. Весовые коэффициенты при предикторах определяются на основе множественной корреляции отобранных предикторов с максимальным уровнем воды. Вычисляются значения всех обобщенных показателей, а затем путем множественной регрессии устанавливаются линейные зависимости между обобщенными показателями и максимальными уровнями воды. Полученные зависимости являются прогностическими. Предложенный подход позволяет использовать преимущества физического подхода (на этапе «конструирования» обобщенных показателей) и объективного статистического анализа (на этапе получения прогностических уравнений).

Методика долгосрочного прогноза максимальных уровней воды

р. Енисей у г. Кызыл

Регрессионная зависимость, прогнозирующая максимальные уровни воды р. Енисей, учитывает характер снегонакопления в высоких зонах бассейна, метеорологическую обстановку и уровневый режим выше исследуемого створа.

Средняя дата наступления максимального уровня р. Енисей у г. Кызыл – 31 мая, ранняя – 29 апреля (1971 г.), поздняя – 23 июня (1989 г.). Учет только характера мартовского атмосферного процесса не дал требуемого результата точности прогноза уровня воды Енисея. Вместе с тем, учет синоптической ситуации в апреле-мае дает возможность предвычисления наиболее вероятного подъема уровня. Все составляющие регрессионного уравнения известны к концу мая. Следует отметить, что вклад майских осадков в расчетную величину уровня воды небольшой, отражается только при экстремальных величинах. Поэтому прогноз по предложенному уравнению регрессии составляется на конец апреля при средней заблаговременности прогноза 1 месяц. При использовании месячного прогноза погоды по территории Республики Тыва предварительный расчет по уравнению регрессии может быть проведен в конце марта.

Прогноз максимальных уровней воды весеннего половодья р. Енисей у г. Кызыл рассчитывается по уравнению регрессии:

$$H_{\max_Кызыл} = 0,842 \cdot S + 1,465 \cdot X1 - 7,346 \cdot T + 2,142 \cdot X2 + 1,996 \cdot \Delta H1 + 0,874 \cdot \Delta H2 + 1,262 \cdot H3 + 282.$$

Коэффициент множественной корреляции – 0,92.

Критерий качества S/σ – 0,39.

Оправдываемость на зависимой выборке (40 лет) – 95 %.

Описание входящих в уравнение регрессии предикторов и их линейных комбинаций представлено в табл. 1.

В качестве авторских испытаний на независимом материале проведен расчет максимального уровня воды в 2007 году. Испытания метода прогноза максимальных уровней воды проводились в оперативном режиме в течение 2008–2010 гг.

Результаты оперативных испытаний метода прогноза максимальных уровней воды весеннего половодья у г. Кызыл представлены в табл. 2.

Средняя оправдываемость метода прогноза максимальных уровней воды весеннего половодья у г. Кызыл за четыре года испытаний составила 100 %. Согласно действующим наставлениям по гидрологическим прогнозам, целесообразно использовать методику долгосрочного прогноза, оправдываемость проверочных прогнозов которой 70 % и более.

Таблица 1

Описание переменных и обобщенных показателей в уравнении прогноза

Обозначение	Смысловое значение	T-статистика
<i>S</i>	Запас воды в снеге на 20 марта, по метеостанциям Тоора-Хем и Казыр с весовыми коэффициентами	7,5
<i>X1</i>	Сумма осадков за апрель, М Сарыг-Сеп	2,1
<i>T</i>	Средняя температура воздуха за апрель, М Эрзин	-3,8
<i>X2</i>	Сумма осадков за период январь-апрель, М Тоора-Хем	3,2
<i>ΔН1</i>	Разность между уровнями воды на 10 апреля и минимальным в марте, р. Большой Енисей – с. Кара-Хак	5,2
<i>ΔН2</i>	Разность между уровнями воды на 20 апреля и минимальным в марте, р. Енисей – г. Кызыл	5,0
<i>X3</i>	Сумма осадков в мае, М Тоора-Хем	2,5

В качестве авторских испытаний на независимом материале проведен расчет максимального уровня воды в 2007 году. Испытания метода прогноза максимальных уровней воды проводились в оперативном режиме в течение 2008–2010 гг.

Результаты оперативных испытаний метода прогноза максимальных уровней воды весеннего половодья у г. Кызыл представлены в табл. 2.

Средняя оправдываемость метода прогноза максимальных уровней воды весеннего половодья у г. Кызыл за четыре года испытаний составила 100 %. Согласно действующим наставлениям по гидрологическим прогнозам, целесообразно использовать методику долгосрочного прогноза, оправдываемость проверочных прогнозов которой 70 % и более.

Таблица 2

**Результаты долгосрочных прогнозов максимальных уровней воды
р. Енисей – г. Кызыл в 2007–2010 гг.**

Год	Наблюденный максимальный уровень, см	Предсказанный максимальный уровень, см	Погрешность расчета, см		Допустимая погрешность, см
2007	450	430	-20	+	56
2008	446	471	-25	+	
2009	496	455	-41	+	
2010	662	626	-36	+	

Рекомендации к внедрению

Учитывая положительные результаты оперативных испытаний метода долгосрочного прогноза максимальных уровней воды весеннего половодья р. Енисей у г. Кызыл в 2007–2010 гг., Технический совет Среднесибирского УГМС в своем решении рекомендовал внедрить метод в оперативную практику гидрологических прогнозов Гидрометцентра ФГБУ “Красноярский ЦГМС-Р” в качестве основного расчетного.

Список литературы

1. Шуляковский Л.Г., Ерёмкина В.А. К методике прогноза заторных уровней воды // Метеорология и гидрология. – 1952. –№ 1.–С. 46–51.