

**О РЕЗУЛЬТАТАХ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА  
МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ  
Р. ТУБА У ПОС. КУРАГИНО И Р. ПОДКАМЕННАЯ ТУНГУСКА  
У С. ВАНАВАРА**

В основу физико-статистических моделей долгосрочного прогноза максимальных уровней воды положены исследования Л.Г. Шуляковского [4], показавшего еще в первой половине прошлого столетия возможность использования в прогнозах регрессионных моделей. Опыт исследований последних лет показал, что предикторы, входящие в регрессионные уравнения, должны учитывать тенденции развития атмосферных процессов и связанные с ними процессы весеннего ослабления прочности ледяного покрова и прибыли воды в реках. Тем самым учитывается инерционный характер развития процессов вскрытия рек, т.е. начальные тенденции развития весенних процессов характеризуют последующий характер вскрытия реки. Например, в лесной, лесостепной и степной зонах Сибири, а также в горах южной Сибири при низкой температуре марта – начала апреля более вероятна холодная погода в первой половине апреля, сменяющаяся интенсивным потеплением в конце апреля – начале мая, что способствует концентрации весеннего половодья. Наоборот, теплая погода марта чаще сопровождается растянутым половодьем.

Максимальные уровни воды формируются не только под влиянием интенсивности прибыли воды в реках. Влияют также процессы образования шуголедяных «пробок» в русле, развивающиеся как в предшествующий осенне-зимний период, так и во время вскрытия и ледохода. Прослеживается влияние неравномерности развития процессов вскрытия по длине реки: более раннее наступление тепла в верхнем течении реки, по сравнению с участком среднего и нижнего течения, способствует развитию заторного характера вскрытия в нижнем течении. Конкретный набор предикторов в регрессионных уравнениях индивидуален для каждого участка реки в зависимости от специфики процессов формирования максимальных уровней воды. Удастся учесть особенности развития этих процессов, например, в нижнем бьефе высоконапорной Красноярской ГЭС, для заболоченных рек Западно-Сибирской равнины, для рек горных районов южной Сибири и Среднесибирского плоскогорья.

Методики прогноза максимальных уровней весеннего половодья при участии в их формировании заторов льда почти исключительно опираются на регрессионный или дискриминантный анализ, что связано с трудностями физико-математического описания процессов образования заторно-зажорных явлений, их многофакторности, зависимости от будущих погодных условий, предсказание которых с необходимой заблаговременностью и точностью пока не представляется возможным. В [1, 2] рассмотрен опыт применения регрессионных моделей прогноза максимальных уровней весеннего половодья в УГМС Сибири. Репрезентативность отобранных из физических соображений предикторов проверяется на обучающей выборке с применением пошаговой регрессии и уточняется с помощью последующего многовариантного подбора на основе корреляции с максимальными уровнями воды.

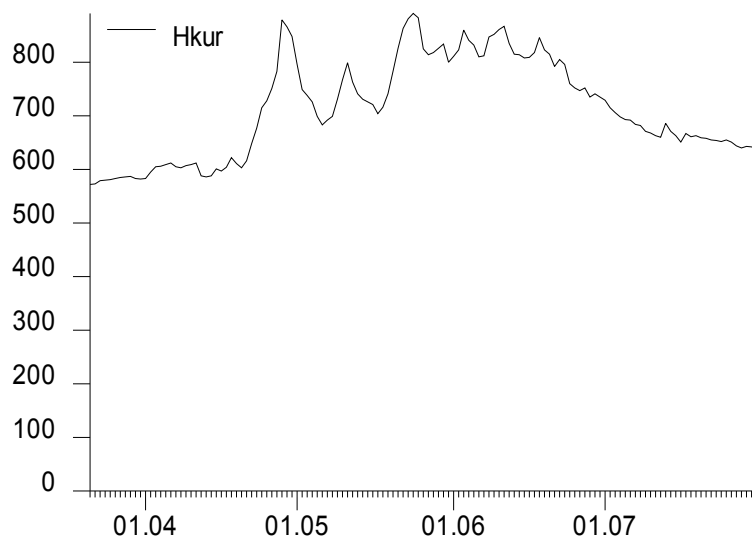
### **Прогноз максимального уровня весеннего половодья р. Туба у пос. Курагино**

Река Туба образуется слиянием рек Казыра, Кизира и Амыла, берущих начало на юго-западных склонах Восточного Саяна. Площадь водосбора р. Туба в замыкающем створе пос. Курагино равна 32900 км<sup>2</sup>. Суммарный слой стока за период половодья в среднем одинаков для всех притоков р. Туба и составляет 550–580 мм, или 64–66 % от годового стока. Половодье состоит из серии подъемов в мае–июне, один из которых является максимальным в году. В последние годы гидрограф стока реки трансформируется из восточносибирского типа (с двумя характерными волнами) в алтайский тип (до девяти пиков половодья, рис. 1), что создает некоторые трудности не только в прогнозировании характеристик максимального стока, но и в их выявлении.

Метеорологические станции и посты в горных районах Сибири располагаются в основном в долинах рек. В исследуемом районе редкая сеть осадкомеров и снегомерных съёмов (один пункт на 2400 км<sup>2</sup>) не позволяет достоверно оценить увлажнённость территории.

Следует указать на слабую освещённость данными наблюдений бассейна р. Туба, особенно его горной части. Для оценки снегонакопления в горах приходится использовать данные стандартного снегомерного маршрута в пункте Оленья Речка и данные автодорожного снегомерного маршрута Минусинск–Кызыл (Усинский тракт). Оба маршрута расположены за пределами бассейна, но благодаря большой высоте и доказанной репрезентативности для стока всего Верхнего Енисея, эти пункты были включены в разработку методики прогноза.

Отобранные пункты снегомерных съемок обеспечивают связи стока воды весеннего половодья р. Туба с запасами воды в снежном покрове (на 20 марта) с коэффициентом корреляции 0,40–0,76.



**Рис. 1. График колебания уровней воды р. Туба – пос. Курагино за весенне-летний период 2005 г.**

Наиболее тесные связи получены с данными снегомерных съемок на маршрутах «Минусинск–Кызыл» и Артемовск, которые расположены на высотах 600–1400 м, в зоне формирования наивысших модулей годового стока.

Уравнения для прогноза максимальных уровней р. Туба у пос. Курагино включают следующие предикторы и обобщенные показатели: запасы воды в снеге на конец марта, количество осадков на предгорных станциях в период формирования максимального уровня воды, уровни воды в речной системе на период выпуска прогноза. Методика долгосрочного прогноза максимального уровня включает одно уравнение для выпуска в марте и уточняющее уравнение для выпуска в апреле.

1. Уравнение для выпуска прогноза в конце марта:

$$H_{\max} = S_1 + 0,743N_1 - 2,46 N - 0,056 \Delta Q + 1,01 X_1 + 961. \quad (1)$$

2. Уравнение для выпуска уточняющих прогнозов в апреле, с учетом апрельских осадков:

$$H_{\max} = S_2 + 0,964 N_2 - 2,753 N - 0,077 \Delta Q + 0,884 X_1 + 0,606 X_2 + 888, \quad (2)$$

где:  $S_1, S_2$  – комплексные показатели снегонакопления в бассейне в конце зимы;

$$S_1 = (0,210 S_{20.ША\text{Артемовск}} + 0,560 S_{6-14 \text{ Ус.тр.}}) + (0,138 S_{12\text{Т Ус.тр.}} - 0,342 S_{14\text{Т Ус.тр.}}),$$

$$S_2 = (0,275 S_{20.ША\text{Артемовск}} + 0,489 S_{6-14 \text{ Ус.тр.}}) + (0,105 S_{12\text{Т Ус.тр.}} - 0,292 S_{14\text{Т Ус.тр.}}),$$

$S_{6-14 \text{ Ус.тр.}}$  – осредненный снегозапас 6–14 точек маршрута «Минусинск–Кызыл» (март),  
 $S_{12 \text{ Ус.тр.}}$  – снегозапас на 12-й точке маршрута «Минусинск–Кызыл» (март),  
 $S_{14 \text{ Ус.тр.}}$  – снегозапас на 14-й точке маршрута «Минусинск–Кызыл» (март);

$H_1, H_2$  – комплексные показатели уровня режима в начале весны:

$$H_1 = H_{\max\text{III}} - 1,22 H_{31.\text{III}} - 0,146 H_{10.\text{IV}} \quad (\text{р. Туба – пос. Курагино}),$$

$$H_2 = H_{\max\text{III}} - 1,03 H_{31.\text{III}} - 0,16 H_{10.\text{IV}} \quad (\text{р. Туба – пос. Курагино});$$

$N$  – количество дней с положительной средней суточной температурой в марте М. Казыр;

$\Delta Q$  – разность средних месячных расходов воды р. Туба с октября по ноябрь;

$X_1, X_2$  – сумма осадков в марте и апреле М. Артемовск.

Таблица 1

**Регрессионная статистика и параметры уравнения регрессии для прогноза максимального уровня воды р. Туба у пос. Курагино**

Характеристика	Уравнение 1	Уравнение 2
Множественный R	0,90	0,93
R-квадрат	0,81	0,86
Критерий качества S/σ	0,50	0,42
Длина обучающей выборки	45	45

Испытания метода проводились в оперативном режиме в течение 2011–2013 гг. Во время авторских испытаний на независимом материале проведен расчет максимального уровня в 2010 году. Результаты оперативных испытаний метода прогноза максимальных уровней воды весеннего половодья у п. Курагино представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты прогноза максимального уровня р. Туба – пос. Курагино (допустимая ошибка 35 см)**

Год	$H_{\max}$ Курагино (наблюденный)	Уравнение 1		Уравнение 2	
		Прогноз	Ошибка	Прогноз	Ошибка
2010	994	958	-36	964	-30
<b>2011</b>	<b>888</b>	<b>953</b>	<b>65</b>	<b>951</b>	<b>63</b>
2012	877	857	-20	855	-22
2013	939	968	29	955	16

Примечание: выделен неоправдавшийся прогноз 75 %.

Средняя оправдываемость метода прогноза за четыре года испытаний составляет 75 %. В 2011 году прогнозное значение оказалось на 0,65 м завышенным. Согласно Наставлению по гидрологическим прогнозам [3], целесообразно использовать методику долгосрочного прогноза, оправдываемость проверочных прогнозов которой 70 % и более.

Оправдываемость по ранее используемой методике (по графикам связи со снегозапасами на М. Оленья Речка и маршруте «Минусинск–Кызыл») за период 2010–2013 гг. оказалась равной 65 %. Таким образом, разработанный метод прогноза имеет более высокую оправдываемость прогноза.

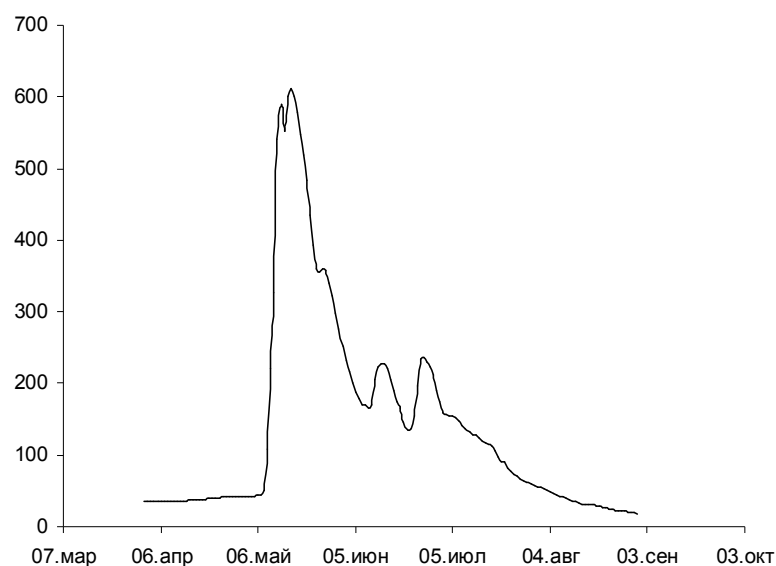
### **Прогноз максимального уровня весеннего половодья**

#### **р. Подкаменная Тунгуска – с. Ванавара**

Река Подкаменная Тунгуска – одна из крупнейших рек Средней Сибири, протекающая в зоне средней тайги и многолетнемерзлых пород, с преимущественно снеговым питанием. Её бассейн расположен в пределах Средне-Сибирского плоскогорья. Река стекает с приподнятой юго-восточной части плоскогорья (Ангарский кряж), далее течет на северо-запад по возвышенному Тунгусскому плато, впадая в Енисей в районе 61° с.ш. Длина – 1865 км, площадь бассейна – 240 тыс. км<sup>2</sup>.

Средние даты начала половодья в бассейне р. Подкаменная Тунгуска приходятся на первую декаду мая. Снеготаяние происходит одновременно почти на всей территории бассейна, так как высоты 200–600 м занимают более 90 % площади водосбора. Вскрытие происходит равномерно по всей реке в среднем 11–15 мая, в конце мая река обычно очищается ото льда. Ледоход длится 5–8 дней и часто сопровождается заторами льда. За время половодья, проходящего в виде одной мощной волны, по реке проходит 65–70 % общего объема годового стока. Пик половодья наступает в середине мая. Общая продолжительность половодья меняется от 40 до 80 дней. Средняя продолжительность ветви подъема – 16 дней, ветви спада – 36 дней. Основная волна половодья проходит одновременно с ледоходом (рис. 2). Средняя дата его наступления – 18 мая, крайние – 26 апреля (2011 г.), 3 июня (1983 г.). Наибольший максимальный уровень был отмечен в 1992 году и составил 1107 см (уровень начала подтопления 750 см), самый низкий – в 1993 г. (325 см).

С июля до октября летняя межень прерывается дождевыми паводками, которых может быть от одного до четырёх в год, однако по высоте они существенно уступают максимуму весеннего половодья.



**Рис. 2. График колебания уровней воды р. Подкаменная Тунгуска – с. Ванавара за весенне-летний период 2005 г.**

Среднемноголетняя дата наступления максимального запаса воды в снеге – 10 апреля – может варьировать от последней декады марта до первой декады мая. Величина максимального снегозапаса на М. Ванавара (высота 259 м БС) составляет 122 мм. Зависимости для максимальных уровней воды от запасов снега и весенних осадков р. Подкаменная Тунгуска, как и для других рек Средней Сибири, характеризуются низкими коэффициентами корреляции (0,30–0,40). Дело в том, что максимальные уровни воды формируются с участием ледово-заторных явлений.

Рассмотрим методику прогноза максимального уровня воды р. Подкаменная Тунгуска у с. Ванавара.

Уравнение для прогноза имеет вид:

$$H_{\max} = 2,28 S + 3,21 H + 4,675 X - 7,077 T - 264, \quad (3)$$

где:  $S$  – комплексный показатель снегонакопления в бассейне в конце зимы:

$$S = S_{\max \text{ Усть-Камо}} - 0,35 S_{31.III \text{ Усть-Камо}} + 1,44 S_{\max \text{ Чемдальск}} - 1,39 S_{10.IV \text{ Чемдальск}};$$

$H$  – уровень начала ледовых явлений р. Подкаменная Тунгуска у с. Ванавара;

$X$  – сумма осадков в марте М. Байкит;

$T$  – комплексный показатель термического режима в бассейне в конце зимы:

$$T = t_{XII} - 1,06 t_I + 0,83 t_{II} - 1,77 t_{III \text{ Ванавара}};$$

$t_{XII}$ ,  $t_I$ ,  $t_{II}$ ,  $t_{III}$  – средняя месячная температура в декабре, январе, феврале и марте.

**Регрессионная статистика и параметры уравнения регрессии для прогноза  
максимального уровня воды р. Подкаменная Тунгуска – с. Ванавара**

Множественный R	0,92
R-квадрат	0,84
Критерий качества S/σ	0,468
Длина обучающей выборки	35

Целесообразность включения того или иного предиктора должна подтверждаться не только общими соображениями о его участии в формировании максимальных уровней воды, но и соответствующими значениями t-статистик, равных отношению коэффициентов регрессии к средним квадратичным ошибкам их определения. Но, главное, методика прогноза должна выдержать проверку на независимом материале наблюдений. Рассматриваемая методика выдержала этот экзамен. За три года оперативных испытаний в ФГБУ «Среднесибирское УГМС» в период 2011–2013 гг. и авторских испытаний на независимом материале в 2010 г. ошибки прогноза не вышли за пределы допустимой (табл. 4). По мере накопления данных наблюдений подобные методики следует уточнять, пересчитывая коэффициенты уравнения.

Таблица 4

**Результаты прогноза максимального уровня воды  
р. Подкаменная Тунгуска – с. Ванавара (допустимая ошибка 110 см)**

Год	$H_{\max}$ Ванавара (наблюденный)	Прогноз	Ошибка
2010	594	649	55
2011	780	744	-36
2012	606	537	-69
2013	743	763	20

Оправдываемость прогнозов за четыре года испытаний составляет 100 %. Оправдываемость по ранее используемой методике (по графикам связи со снегозапасами на М. Ванавара, Чемдальск, Стрелка Чуня, Муторай) равна 58 %. Таким образом, разработанный метод прогноза обеспечивает более высокую оправдываемость прогноза, по сравнению с ранее использовавшимся.

## Рекомендации к внедрению

Учитывая положительные результаты оперативных испытаний методов долгосрочного прогноза максимальных уровней воды весеннего половодья р. Туба у пос. Курагино и р. Подкаменная Тунгуска у с. Ванавара в 2010–2013 гг., Технический совет ФГБУ «Среднесибирское УГМС» в своем решении от 14.11.2013 г. рекомендовал их внедрение в качестве основных расчетных методов в оперативную практику гидрологических прогнозов Гидрометцентра ФГБУ «Среднесибирское УГМС».

## Список литературы

1. Бураков Д.А., Космакова В.Ф., Гордеев И.Н. О результатах испытания метода прогноза максимальных уровней воды весеннего половодья р. Енисей у г. Кызыл // Информационный сборник «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2012. – № 39. – С. 121–126.
2. Бураков Д.А., Космакова В.Ф. Опыт разработки методов долгосрочного прогноза максимальных уровней воды на затороопасных участках рек Ангары и Енисея // Вопросы географии Сибири. – 2006. – Вып. 26. – С. 5–9.
3. Наставление на службе прогнозов. Раздел 3. Служба гидрологических прогнозов. Ч. I. Прогнозы режима вод суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 193 с.
4. Шуляковский Л.Г., Еремина В.А. К методике прогноза заторных уровней воды // Метеорология и гидрология. – 1952. – № 1. – С. 46–51.