

Д.А. Бураков, В.Ф. Космакова, Л.А. Младенцева, А.П. Кузнецова

**МЕТОД ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА УРОВНЕЙ ВОДЫ
(ВКЛЮЧАЯ УРОВНИ ЗАТОРНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ)
НА УЧАСТКАХ СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ ЕНИСЕЯ
(г. Енисейск – Подкаменная Тунгуска, Тасеева – пос. Машуковка)**

Описание метода

В основу методики положены исследования Л.Г. Шуляковского, показавшего возможность использования регрессионных моделей, учитывающих факторы, наиболее полно характеризующие условия формирования максимальных уровней воды [1]. Ниже рассмотрены результаты реализации этого подхода на участках рек Томь, Енисей и Тасеева.

Для разработки методик прогноза максимальных уровней сначала подбирались оптимальные уравнения для обобщенных параметров, характеризующих условия формирования максимальных уровней. Они представляют линейные комбинации соответствующих гидрометеорологических предикторов, измеряемых в пунктах наблюдений гидрометеорологической сети. К ним относятся:

- характеристика толщины льда и изменение толщины льда по длине участка реки;
- показатель теплозапасов почвы;
- показатели температуры воздуха в марте и апреле;
- показатели влагообеспеченности (количества осадков) апреля или марта–апреля;
- показатель снегонакопления;
- осенний сток.

Рассмотрим используемые 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 марта более вероятна холодная погода в первой половине апреля и последующее интенсивное потепление в конце апреля – начале мая, усиливающее концентрацию весеннего половодья. Теплое начало марта чаще сопровождается растянутым 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 величину таяния и оставшегося в бассейне 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 и предопределяет уровень затора реки в период вскрытия.

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

Итак, линейные комбинации перечисленных предикторов и есть соответствующие обобщенные показатели. Весовые коэффициенты в этих комбинациях определяются на основе множественной корреляции отобранных предикторов с максимальным уровнем воды. Далее вычисляются значения всех обобщенных показателей за каждый год и

путем множественной регрессии устанавливаются линейные зависимости между обобщенными показателями и максимальными уровнями воды. Это и есть искомые уравнения для прогнозов. Предложенный путь позволяет использовать преимущества физического подхода (на этапе «конструирования» обобщенных показателей) и объективного статистического анализа (на этапе получения прогностических уравнений). В расчетах использовались данные наблюдений за последние 35–50 лет.

Методика прогноза максимального уровня воды р. Тасеева – пос. Машуковка

Створ расположен на р. Тасеева в 46 км от ее впадения в р. Ангара. Устье р. Тасеева находится примерно в 60 км от места впадения р. Ангара в р. Енисей. До пуска Красноярской ГЭС на участке р. Тасеева от устья до расчетного створа практически каждый год возникали заторы. Заторы льда обусловлены более поздним вскрытием р. Ангара, что приводило к остановке ледохода в устьевом участке р. Тасеева. Однако при благоприятных гидравлических условиях в устье наблюдались случаи, когда лед р. Тасеева подныривает под лед р. Ангара и затора не образуется или он небольшой (скопление льда распространяется вверх по течению р. Тасеева не более 7 км), так что образование затора в устье не сказывается на ходе уровня в расчетном створе пос. Машуковка. После ввода в эксплуатацию Красноярской ГЭС, как показал анализ, в связи с изменением гидрологического режима р. Енисей, устьевой участок р. Ангара теперь в 40 % случаев вскрывается раньше, чем устьевой участок р. Тасеева. В такие годы ледостав на р. Ангара не является естественным препятствием для льда, выносимого р. Тасеева. Но при соответствующих гидрометеорологических условиях вскрытия, когда р. Ангара вскрывается позднее, чем р. Тасеева, затор может распространиться по р. Тасеева до Машуковки и даже выше по течению, вплоть до места впадения р. Усолка, как это было в 1969 и 1988, 2004 гг. и в некоторые другие годы.

Таким образом, на рассматриваемом участке гидрологический режим определяется сложным взаимодействием водного и ледового режимов трех названных рек (Енисей, Тасеева, Ангара), что нашло отражение в наборе предикторов прогностических уравнений. Отобранные

предикторы характеризуют изменение уровней воды в гидрологической системе, снегонакопление, относительное стайвание снега до перехода среднесуточной температуры воздуха через ноль градусов, пропускную способность русла в месте впадения р. Тасеева в р. Ангара и весенние осадки. Максимальный уровень воды весеннего половодья р. Тасеева – пос. Машуковка ($H_{T,max}$) наступает в среднем 7 мая, крайние сроки – 22 апреля и 26 мая.

Уравнение для предварительного прогноза имеет вид:

$$\begin{aligned} H_{T,max} &= 3,631S_T - 342,813C_H + 285,320, \\ R &= 0,848, S/\sigma = 0,548. \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнение для прогноза в конце марта:

$$\begin{aligned} H_{T,max} &= 3,127S_T - 287,325C_H + 2,802C_S + 6,492X_{III} + 231,427, \\ R &= 0,904, S/\sigma = 0,458. \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнение для прогноза в конце третьей декады апреля, для тепло-го и/или дождливого апреля:

$$\begin{aligned} H_{T,max} &= 4,023S_T - 307,080C_H - 0,559(\Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3) + \\ &4,782X_{IV(3)} + 229,079, \\ R &= 0,902, S/\sigma = 0,438. \end{aligned} \quad (3)$$

Описание переменных и обобщенных показателей в уравнениях (1), (2), (3) даны в табл.1.

Таблица 1

Описание переменных и обобщенных показателей в уравнениях (1), (2), (3)

Переменная	Описание переменных и обобщенных показателей	t – значения (1), (2), (3)
S_T	$S_T = (1,5S_3 + S_2)/2/5$ – запас воды в снеге на 20 марта, где S_1 – запас воды в снеге, Шиткино; S_2 – запас воды в снеге, Тайшет.	6,2; 5,3; 8,0
C_H	$C_H = ((H_5 - 10) - (H_6 + 5))/(H_5 - 10)$ – показатель пропускной способности русла (уровни воды принимаются в виде превышений над минимальными в многолетнем ряду), где H_5 – уровень воды р. Ангара – д. Татарка на момент начала появления ледовых образований; H_6 – уровень воды р. Тасеева – пос. Машуковка на момент начала появления ледовых образований.	-5,7; -4,3; -3,7

Продолжение табл. 1

Переменная	Описание переменных и обобщенных показателей	t – значения (1); (2); (3)
C_H	$C_H = ((H_5 - 10) - (H_6 + 5)) / (H_5 - 10)$ – показатель пропускной способности русла (уровни воды принимаются в виде превышений над минимальными в многолетнем ряду), где H_5 – уровень воды р. Ангара – д. Татарка на момент начала появления ледовых образований, H_6 – уровень воды р. Тасеева (у пос. Машуковка) на момент начала появления ледовых образований.	–5,7; –4,3; –3,7
C_S	$C_S = S_6 / S_T$ – характеристика относительного стаивания снега до момента окончательного перехода через 0 °С среднесуточной температуры воздуха. S_T – сумма максимальной суточной температуры воздуха за период от перехода максимальной суточной температуры воздуха через 0 °С до перехода через 0 °С среднесуточной температуры воздуха весной.	2,5
X_{III}	$X_{III} = (X_{III \text{ Чуня}} + X_{III \text{ Абан}}) / 2$ – сумма осадков за март (Абан, Чуня), которые отражают дополнительное поступление воды и косвенно – влажность воздуха и потери воды на испарение.	2,1
$X_{IV(3)}$	Сумма осадков за третью декаду апреля, Абан	2,7
$\Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3$	Изменение уровня воды за третью декаду марта (ΔH_1), первую (ΔH_2) и вторую (ΔH_3) декаду апреля р. Тасеева – пос. Машуковка	–3,2

Методика прогноза максимального уровня воды р. Енисей – г. Енисейск

После создания на р. Енисей высоконапорной плотины Красноярской ГЭС в нижнем бьефе ежегодно образуется полынья длиной от 60 до 300 км. Одним из комплексных показателей теплового состояния реки является температура воды ниже плотины, а также расстояние до кромки ледостава, либо величина продвижения кромки льда за некоторый фиксированный период времени. В пунктах, расположенных на небольшом расстоянии от кромки, установление ледостава происходит

значительно позже, а вскрытие – раньше. Сроки наступления и продолжительность ледостава в этих пунктах является репрезентативными комплексными гляциогидрологическими показателями. Например, на р. Енисей – г. Енисейск максимальный уровень воды наступает, как правило, на 10-й – 60-й (1998 г.) день после прохождения ледохода и связан с величиной и интенсивностью поступления воды с промежуточной площади водосбора на участке ниже ангарских и енисейских ГЭС. Приведем уравнения для прогноза максимального уровня воды ($H_{E\max}$) у г. Енисейска.

1. Уравнение для выпуска прогноза в конце второй декады марта:

$$H_{E\max} = 2,308S_E - 2,322T_1 - 4,068\Delta T_1 + 650,00, \quad (4)$$

показатели точности: $R=0,826$, критерий качества прогноза $S/\sigma = 0,570$.

2. Уравнение для уточнения прогноза в конце апреля:

$$H_{E\max} = 2,324S_E + 3,216\Delta T_2 + 6,348X_1 + 159,379, \quad (5)$$

показатели точности: $R = 0,904$, критерий качества прогноза $S/\sigma = 0,458$.

Описание переменных и обобщенных показателей в уравнениях (4) и (5) даны в табл. 2.

Длина замерзающего участка р. Енисей от кромки ледостава до г. Енисейск изменяется от года к году, составляя в среднем 300–350 км. Первые две переменные уравнения (4) характеризуют ледовый и водный режимы в период установления ледостава и вскрытия. Средняя дата наступления $H_{E\max}$ – 11 мая, крайние – 28 марта (1983 г.), 30 мая (1974 г.).

Продвижение кромки ледостава в марте – апреле (ΔT_2) характеризует сроки вскрытия и степень дружности весны: раннее вскрытие означает раннюю и затяжную весну с невысоким подъемом уровней воды. Запас воды в снеге (S_E) отражает влияние «снежности» зимы. Значительные осадки в марте – апреле дают дополнительный приток с площади Красноярская ГЭС – г. Енисейск, включая р. Ангара.

Прогностические значения максимальных уровней воды на р. Енисей у г. Енисейск в период с 2003 по 2006 г. и их ошибки представлены в табл. 3.

Таблица 2

Описание переменных и обобщенных показателей в уравнениях (4) и (5)

Переменная	Описание переменных и обобщенных показателей	t – значения (4), (5)
S_E	$S_E = (S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5)/5$ – показатель снегонакопления, где S_1 – запас воды в снеге на 20 марта, Чуня; S_2 – запас воды в снеге на 20 марта, Артемовск; S_3 – запас воды в снеге на 20 марта, Ильинка; S_4 – запас воды в снеге на 20 марта, Шиткино; S_5 – запас воды в снеге на 20 марта, Щетинкино	6,9 7,8
T_1	Период ледостава р. Енисей – с. Казачинское, чем он больше, тем более затяжная весна и ниже H_{max}	–4,2
ΔT_1	Период установления ледостава на участке Енисейск – Ворогово, чем он больше, тем ниже уровень при установлении ледостава	–3,2
ΔT_2	Разность сроков вскрытия р. Енисей – с. Казачинское и р. Енисей – пгт Стрелка, показатель характера весны	4,0
X_1	$X = 0,56X_1 + 0,44X_2$, где X_1 – сумма осадков за март и X_2 – сумма осадков за апрель, пгт Стрелка	3,3

Таблица 3

Результаты долгосрочных прогнозов максимальных уровней воды на р. Енисей – г. Енисейск в 2005–2006 гг. (допустимая ошибка прогноза 94 см)

Год	H_{max} наблюдаемый	H_{max} , рассчитанный по уравнению (4) / ошибка прогноза	H_{max} , рассчитанный по уравнению (5) / ошибка прогноза
2003	693	830/137	767/–74
2004	1089	978/111	1014/75
2005	768	856/–88	795/–27
2006	877	888/–11	854/23

Методика прогноза максимального уровня воды р. Енисей у д. Подкаменная Тунгуска

Рассмотрим методику прогноза максимального уровня воды р. Енисей у д. Подкаменная Тунгуска ($H_{\text{птmax}}$), расположенной на 2 км ниже устья р. Подкаменная Тунгуска. В этом створе максимальные уровни воды бывают как заторного, так и незаторного происхождения. Средняя дата вскрытия – 21 мая, крайние – 30 апреля (1997 г.), 7 июня (1980 г.). Сроки наступления $H_{\text{птmax}}$ весеннего половодья в 70 % случаев совпадают с началом ледохода.

Уравнение для выпуска прогноза в конце второй декады марта имеет вид:

$$H_{\text{птmax}} = 3,914S_{\text{пт}} + 2,334\Delta H_4 - 1,668L_1 - 5,245D_2 + 2021,1, \quad (6)$$

$$R = 0,898, S/\sigma = 0,475.$$

$$H_{\text{птmax}} = 3,241S_{\text{пт}} + 1,951\Delta H_4 - 1,437L_1 - 4,839D_2 - + 0,906\Delta H_5 + 1987,872, \quad (7)$$

$$R = 0,915, S/\sigma = 0,439.$$

Описание переменных и обобщенных показателей в уравнениях (6) и (7) даны в табл. 4.

Таблица 4

Описание переменных и обобщенных показателей в уравнениях (6) и (7)

Переменная	Описание переменных и обобщенных показателей	t – значения (6); (7)
$S_{\text{пт}}$	$S_{\text{пт}} = (0,65S_3 + 0,35S_5)$ – показатель снегонакопления, где S_3 – запас воды в снеге на 20 марта, Чуняя; S_5 – запас воды в снеге на 20 марта, Ванавара	4,1
ΔH_4	ΔH_4 – разность уровней воды в пунктах р. Енисей – д. Вахта и р. Енисей – с. Ворогово на момент начала ледовых образований осенью	–6,5
ΔH_5	Разность изменения уровня воды р. Енисей – д. Подкаменная Тунгуска за третью и вторую декады апреля: $\Delta H_5 = (H_{20.IV} - H_{10.IV}) - (H_{10.IV} - H_{1.IV})$ (равномерность и интенсивность подъема уровня воды до начала подвижек)	
L_2	Минимальное за зиму расстояние кромки ледостава от г. Красноярск	–4,1
D_2	Дата наступления ледохода р. Енисей – с. Казачинское (число дней от 1 января), средняя дата ледохода – 15 марта	–5,0

Комплексный показатель ΔH_4 характеризует пропускную способность участка реки. Показатель L_1 характеризует суровость зимы, следовательно, толщину и прочность льда. Комплексный показатель D_2 характеризует условия весны.

Результаты испытаний

В отделе гидрологических прогнозов (ОГП) Гидрометцентра Красноярского ЦГМС-Р, долгосрочный прогноз максимального уровня весеннего половодья на р. Енисей у г. Енисейск до настоящего времени составляется по методике И.М. Чернова. Исходными данными в уравнениях регрессии являются:

- снегозапасы на конец марта;
- толщина льда;
- планируемые сбросы воды ГЭС на май–июнь.

Методика позволяет выпускать прогноз максимального уровня с заблаговременностью 1–1,5 мес.

В 2006 г. в ОГП проводились испытания по новой методике отдела разработки и внедрения гидрометеорологических прогнозов (ОриВГП).

Результаты испытаний приведены в табл. 5.

Таблица 5

р. Енисей – г. Енисейск (допустимая ошибка – 94 см)					
Год	Прогноз		Факт. <i>H</i> max	Ошибка	
	ОГП	НИЦ		ОГП	НИЦ
2004	950	978	1089	139	111
2005	790	856	768	–22	–88
2006	810	888	886	76	–2

Примечание: НИЦ – Научно-исследовательский центр Среднесибирского УГМС.

Оправдываемость прогнозов ОриВГП – 2/3 – 67 %.

Оправдываемость прогнозов ОГП – 2/3 – 67 %.

Следует подчеркнуть, что ряд данных наблюдений для реализации методики ОГП (И.М. Чернов) отсутствуют и задавались приближенно по наблюдениям ближайших пунктов.

Прогноз максимального уровня воды на р. Енисей у д. Подкаменная Тунгуска выпускается с 1970 г. по методике И.М. Чернова.

Методика ОРивГП для прогноза максимального уровня воды р. Енисей – д. Подкаменная Тунгуска предлагает три формулы. Результаты испытаний за последние 10 лет приведены в табл. 6.

Таблица 6

р. Енисей – д. Подкаменная Тунгуска (допустимая ошибка – 118 см)									
Год	Факт <i>H</i> _{max}	Прогноз ОГП	Ошибка ОГП	Прогноз НИЦ					
				Ф-ла (1)	ошибка	Ф-ла (2)	ошибка	Ф-ла (3)	ошибка
1997	1765	1850	–85	1807	–42	1684	81	1774	–9
1998	1770	1650	120	1754	16	1756	14	1723	47
1999	2018	1850	168	2070	–52	2035	–17	2065	–47
2000	1784	1600	184	1774	10	1796	–12	1836	–52
2001	2089	1800	289	2043	46	2003	86	2069	20
2002	2072	1900	172	2104	–32	2112	–40	2086	–14
2003	1771	1750	21	1648	123	1660	111	1653	118
2004	1882	1850	32	1969	–87	1964	–82	1948	–66
2005	1636	1650	–14	1772	–136	1785	–149	1745	–109
2006	1797	1700	97	1738	26	1762	3	1701	63

Оправдываемость прогнозов ОГП – 6/10 – 60 %.

Оправдываемость прогнозов ОРивГП по формуле (1) – 8/10 – 80 %.

Оправдываемость прогнозов ОРивГП по формуле (2) – 9/10 – 90 %.

Оправдываемость прогнозов ОРивГП по формуле (3) – 10/10 – 100 %.

Методика ОРивГП для прогноза максимального уровня воды р. Тасеева – пос. Машуковка) испытывалась в отделе гидропрогнозов в 2005–2006 гг. Результаты испытаний приведены в табл. 7.

Таблица 7

р. Тасеева – пос. Машуковка (допустимая ошибка – 95 см)							
Год	Факт, H_{\max}	Формула (1)		Формула (2)		Формула (3)	
		H_{\max} прогноз	ошибка	H_{\max} прогноз	ошибка	H_{\max} прогноз	ошибка
2005	724	591	133	542	182	596	128
2006	750	781	–31	779	–29	777	–27

Оправдываемость прогнозов по формуле (1) – $1/2 - 50\%$.

Оправдываемость прогнозов по формуле (2) – $1/2 - 50\%$.

Оправдываемость прогнозов по формуле (3) – $1/2 - 50\%$.

Технический совет Среднесибирского УГМС 14 ноября 2006 г. обсудил результаты оперативных испытаний методов долгосрочного прогноза уровней воды, отметил актуальность и своевременность разработки данного метода прогноза. Учитывая положительные результаты испытания метода долгосрочного прогноза уровней воды (включая уровни заторного происхождения) на участках среднего течения р. Енисей – г. Енисейск – д. Подкаменная Тунгуска, рекомендовал его к внедрению в качестве основного расчетного метода в отделе гидрологических прогнозов Гидрометцентра Красноярского ЦГМС-Р. Технический совет рекомендовал продолжить оперативные испытания метода долгосрочного прогноза уровней воды (включая уровни заторного происхождения) р. Тасеева – пос. Машуковка в марте–мае 2007 г.

Список литературы

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