

**МЕТОД ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ  
ВОДЫ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНЫХ ЗАТОРОВ ЛЬДА  
(Р. ЕНИСЕЙ – С. НАЗИМОВО, Р. ЕНИСЕЙ – С. ЯРЦЕВО,  
Р. ТАСЕЕВА – ПОС. МАШУКОВКА)**

В основу метода 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 р. Енисей – с. Назимово, р. Енисей – с. Ярцево.

Для этого выделены основные моменты формирования максимального (заторного) уровня воды на сибирских реках:

- снегонакопление в бассейне, как основной показатель водности;
- пропускная способность русла на момент вскрытия;
- прочность и толщина льда;
- характер весны (температура воздуха, влагообеспеченность в марте-апреле);
- расстояние до плотины ГЭС (для р. Енисей).

После создания на Енисее 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.

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.

Набор этих предикторов определяется сначала из физических соображений. Далее проверяется их репрезентативность на основе корреляции с максимальными уровнями воды. Рассмотрим используемые предикторы.

1. Запасы воды в снеге в пунктах наблюдений характеризуют количество поступившей на водосбор талой воды.
2. Количество весенних осадков отражает дополнительное поступление воды, и косвенно – влажность воздуха и потери воды на испарение.
3. Осенний сток характеризует запасы влаги и льдистость почвы к моменту начала снеготаяния, либо водность реки в период замерзания и пропускную способность русла.

4. Положение кромки ледостава зимой и максимальная толщина льда указывают на объем льда, его прочность и определяют заторность реки в период вскрытия.

5. 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.

6. Изменение уровня воды в марте – начале апреля является комплексным показателем тенденции процессов, происходящих в бассейне и русле перед вскрытием.

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).

Конкретный набор предикторов и вид регрессионных уравнений индивидуален для каждого участка реки в связи с различием условий образования заторов льда. В расчетах использовались данные наблюдений с 1974 по 2004 г.

## **1. Результаты испытания методики долгосрочного прогноза максимальных уровней воды р. Енисей – с. Назимово, с. Ярцево, и р. Тасеева – пос.**

**Машуковка**

Методика для прогноза максимальных уровней воды р. Енисей у с. Назимово и с. Ярцево испытывалась в отделе гидрологических прогнозов весной 2007 г. Результаты испытаний приведены в табл. 2, 3, 5, 6.

### ***1.1. Методика прогноза максимального уровня воды р. Енисей - с. Назимово***

С. Назимово находится на 178 км ниже г. Енисейска и на 445 км ниже Красноярской ГЭС. Р. Енисей у с. Назимово вскрывается, как правило, позднее, чем в Енисейске, иногда на целый месяц (1983 г.), или одновременно (1997 г.). Наступление максимального уровня в этих створах может происходить одновременно (1979, 2003, 2004, 2006 гг.), или в с. Назимово гораздо раньше (в 1982 г. - на 27 дней), или намного позже (в 1983 г. - на 55 дней), чем в Енисейске. Средняя дата наступления максимального уровня воды (Н<sub>пт</sub>) - 9 мая; крайние сроки - 14 апреля (1981 г.), 25 мая (1989 г.).

В методике для с. Назимово используются четыре уравнения. По первому и второму уравнениям расчет производится в конце третьей декады марта, а третье и четвертое уравнения используются как уточняющие в конце третьей декады апреля.

Уточняющие уравнения учитывают характер погоды в апреле. Прогноз уточняется в том случае, когда в апреле выпадает осадков более 50 мм по метеостанции (мтс) Стрелка на Ангаре. Если апрель холодный, то выпавшие в апреле осадки увеличат снегозапасы (максимальные снегозапасы накапливаются в апреле), а последующее тепло приведет к интенсивному снеготаянию и повысит максимальный уровень воды. Если апрель будет теплым, тогда, несмотря на выпадающие осадки, снегозапасы в апреле могут не увеличиваться (слой таяния окажется больше слоя осадков). В этом случае максимальное снегонакопление наступает в марте. Из-за раннего наступления тепла снеготаяние окажется продолжительным и менее интенсивным, и, несмотря на выпавшие в апреле осадки, максимальный уровень воды не увеличится.

В уравнениях используются следующие предикторы:

- запас воды в снеге на 20 марта;
- максимальные снегозапасы;
- максимальная толщина льда в с. Ворогово;
- комплексный показатель прочности льда и суровость зимы;
- разность среднемесячных расходов воды;
- среднемесячные сбросы воды Усть-Илимской ГЭС в марте;
- разности уровней воды.

Уравнения для прогноза максимального уровня воды ( $H_{\text{нmax}}$ ) в конце третьей декады марта:

$$H_{\text{нmax}} = 3,603S_1 + 4,388h_1 - 0,136\Delta Q_1 + 0,123Q_2 - 0,319\Delta\Delta H_2 - 477,520, \quad (1)$$

показатели точности:  $R = 0,880$ ,  $S/\sigma = 0,516$ .

$$H_{\text{нmax}} = 3,707S_1 + 181,797C_1 - 0,155\Delta Q_1 + 0,117Q_2 - 0,291\Delta\Delta H_2 - 222,032, \quad (2)$$

показатели точности:  $R = 0,906$ ,  $S/\sigma = 0,460$ .

Уравнения для прогноза максимального уровня воды ( $H_{\text{нmax}}$ ) в конце третьей декады апреля (учитывается характер погоды в апреле):

$$H_{\text{нmax}} = 3,603S_2 + 4,388h_1 - 0,136\Delta Q_1 + 0,123Q_2 - 0,319\Delta\Delta H_2 - 477,520, \quad (3)$$

показатели точности:  $R = 0,880$ ,  $S/\sigma = 0,516$

$$H_{\text{нmax}} = 3,707 S_2 + 181,797C_1 - 0,155\Delta Q_1 + 0,117Q_2 - 0,291\Delta\Delta H_2 - 222,032, \quad (4)$$

показатели точности:  $R = 0,906$ ,  $S/\sigma = 0,460$ ,

где  $R$  – коэффициент множественной корреляции;  $S$  – средняя квадратичная ошибка прогноза максимальных уровней воды;  $\sigma$  – их стандартное отклонение.

Описание переменных и обобщенных показателей в приведенных уравнениях даны в табл. 1.

Прогноз следует уточнить по уравнению (3) и (4) в случае, когда в апреле выпадает большое количество осадков, больше 50 мм (метеостанция Стрелка на Ангаре) -

1978, 1983, 1992, 1998, 2005 гг., используя показатель максимального запаса воды в снеге ( $S_2$ ), который может наступить как в марте, так и в апреле.

Результаты прогнозов приведены в табл. 2. Поскольку весна 2007 г. была ранней и осадков в апреле было меньше 50 мм, уровни по уравнениям (1), (3) и (2), (4) получились одинаковыми.

Таблица 1

**Описание переменных и обобщенных показателей в уравнениях**

Переменная	Описание переменных и обобщенных показателей	$t^*$ -значения (1), (2), (3), (4)
$S_1$ $S_2$	запас воды в снеге на 20 марта, Чуня максимальный запас воды в снеге, Чуня	5,3; 6,1
$h_1$	$h_1$ - максимальная толщина льда р. Енисей – с. Ворогово	4,0
$C_1$	$C_1 = h_1/L_1$ – комплексный показатель прочности льда и суровости зимы, где $h_1$ - максимальная толщина льда р. Енисей – с. Ворогово; $L_1$ - максимальное за зиму приближение кромки ледостава к г. Красноярску	5,2
$\Delta Q_1$	$\Delta Q_1 = 0,56(Q_{XII} - Q_{XI}) + 0,44(Q_I - Q_{XII})$ , где $(Q_{XII} - Q_{XI})$ - разность среднемесячных расходов воды р. Енисей – г. Енисейск за декабрь и ноябрь $(Q_I - Q_{XII})$ – разность среднемесячных расходов воды р. Енисей – г. Енисейск за январь и декабрь	-3,2; -4,2
$Q_2$	среднемесячный сброс воды Усть-Илимской ГЭС за март	5,2 5,5
$\Delta \Delta H_2$	$\Delta \Delta H_2 = (\Delta H_5 - \Delta H_3)$ , где $\Delta H_3 = (H_7 - H_8)$ – превышение максимального зимнего уровня воды над предледоставным р. Енисей – с. Назимово; $H_7$ – максимальный зимний уровень воды р. Енисей – с. Назимово; $H_8$ – уровень воды в момент наступления ледовых образований р. Енисей – с. Назимово; $\Delta H_5 = (H_9 - H_{10})$ – превышение максимального зимнего уровня воды над предледоставным р. Енисей – г. Енисейск; $H_9$ – максимальный зимний уровень воды р. Енисей – г. Енисейск; $H_{10}$ – уровень воды в момент наступления ледовых образований р. Енисей – г. Енисейск	-2,5 -2,6

*Примечание.*  $t$ -значение определяется отношением коэффициента регрессии к средней ошибке его оценки

Таблица 2

**Результаты долгосрочных прогнозов максимальных уровней воды  
на р. Енисей – с. Назимово (допустимая ошибка прогноза – 132 см)**

Год	Н <sub>мах</sub> факт	Уравнение (1)		Уравнение (2)		Уравнение (3)		Уравнение (4)	
		Н <sub>мах</sub> прогноз	ошибка	Н <sub>мах</sub> прогноз	ошибка	Н <sub>мах</sub> прогноз	ошибка	Н <sub>мах</sub> прогноз	ошибка
2007	823	953	-130	881	-58	953	-130	881	-58

Оправдываемость прогноза по (1) уравнению - 1 / 1 – 100 %.

Оправдываемость прогноза по (2) уравнению - 1 / 1 – 100 %.

Оправдываемость прогноза по (3) уравнению - 1 / 1 – 100 %.

Оправдываемость прогноза по (4) уравнению - 1 / 1 – 100 %.

В табл. 3 приведены результаты авторских испытаний в 2005-2006 гг. и оперативных прогнозов, выполненных в 2007 г. по данным независимых наблюдений в отделе гидрологических прогнозов Красноярского ЦГМС-Р.

Таблица 3

**Результаты долгосрочных прогнозов максимальных уровней воды  
на р. Енисей – с. Назимово в 2005-2007 гг. (допустимая ошибка прогноза 132  
см)**

Год	Н <sub>мах</sub> , факт	Уравнение (1)		Уравнение (2)		Уравнение (3)		Уравнение (4)	
		Н <sub>мах</sub> , прогноз	ошибка	Н <sub>мах</sub> , прогноз	ошибка	Н <sub>мах</sub> , прогноз	ошибка	Н <sub>мах</sub> , прогноз	ошибка
2005	753	595	158	574	179	659	94	640	113
2006	594	623	-29	654	-60	623	-29	654	-60
2007	823	953	-130	888	-65	953	-130	888	-65

Примечание. В апреле 2005 г. выпало 56 мм осадков (мтс Стрелка на Ангаре) – необходимое условие для уточнения прогноза.  $S_1 = 92$  мм,  $S_2 = 105$  мм, средняя дата наступления максимального уровня воды Н<sub>мах</sub> - 3 мая.

**1.2. Методика прогноза максимального уровня воды р. Енисей - с. Ярцево**

Село Ярцево находится на 280 км ниже г. Енисейска, на 102 км ниже с. Назимово.

Рассматриваемый участок реки является одним из самых затороопасных на Енисее. За

период с 1974 по 2006 г. в 50% случаев максимальный уровень здесь наблюдался при затоплении льда, но в отдельные годы он отмечался намного позже начала ледохода, на 20-21 день (1989, 2002 гг.). Средняя дата наступления максимального уровня воды Нямах – 13 мая; крайние сроки - 25 апреля (1997 г.), 29 мая (2006 г.).

В методике для прогноза максимального уровня воды для с. Ярцево используются два уравнения. По первому уравнению прогноз выпускается в конце третьей декады марта, а по второму, уточняющему, - в конце третьей декады апреля. Прогноз уточняется в том случае, если апрель был холодный и не произошло еще вскрытие реки.

В уравнениях используются следующие предикторы:

- максимальный запас воды в снеге;
- максимальная толщина льда;
- уровень воды начала ледообразования;
- период установления ледостава с. Ярцево – с. Ворогово;
- изменение уровня воды за третью декаду апреля.

Уравнения для прогноза максимального уровня воды в конце третьей декады марта:

$$Н_{\text{ямах}} = 4,090S_2 + 6,520h_1 + 2,775H_1 + 16,443\Delta T_3 - 634,406, \quad (5)$$

показатели точности:  $R = 0,891$ ,  $S/\sigma = 0,486$ ;

Уравнения для прогноза максимального уровня воды в конце третьей декады апреля:

$$Н_{\text{ямах}} = 4,637S_2 + 4,207h_1 + 2,713H_1 + 13,222\Delta T_3 + 0,877H_4 - 531,396 \quad (6)$$

показатели точности:  $R = 0,923$ ,  $S/\sigma = 0,422$ .

Описание переменных и обобщенных показателей в приведенных уравнениях даны в табл. 4.

В 2007 г. весна была теплой, вскрытие произошло 25 апреля, на 11 дней раньше нормы (6 мая). Поэтому уточнения в апреле не было. Результаты прогнозов приведены в табл. 5.



В табл. 6 приведены результаты оперативных прогнозов по данным независимых наблюдений. Прогнозы оправдались во всех рассмотренных случаях.

Таблица 4

**Описание переменных и обобщенных показателей в уравнениях**

Переменные	Описание переменных и обобщенных показателей	t-значения (5), (6)
S <sub>2</sub>	максимальный запас воды в снеге, Чуня	5,7; 7,1
h <sub>1</sub>	максимальная толщина льда р. Енисей – с. Ворогово;	5,8; 3,4
H <sub>1</sub>	уровень воды на момент начала ледовых образований р. Енисей – с. Ярцево (уровни воды принимаются в виде превышений над минимальными (150 см) в многолетнем ряду: $H_1 = (H - 150)$ )	4,7; 5,2
ΔT <sub>3</sub>	период установления ледостава на участке с. Ярцево – с. Ворогово, показатель зашугованности русла; с. Ворогово расположено в 114 км ниже с. Ярцево	5,3; 4,5
H <sub>4</sub>	изменение уровня воды р. Енисей – с. Ярцево за третью декаду апреля: $H_4 = (H_{30.IV} - H_{20.IV})$ , при наличии ледостава - комплексный показатель тенденции процессов, происходящих в бассейне и русле перед вскрытием	3,1

Таблица 5

**Результаты долгосрочных прогнозов максимальных уровней воды**

**на р. Енисей – с. Ярцево (допустимая ошибка – 135 см)**

Год	H <sub>max</sub> , факт	Уравнение (5)	
		H <sub>max</sub> прогноз	ошибка
2007	1409	1348	61

Оправдываемость прогноза по (5) уравнению – 1 / 1 – 100 %

**Результаты долгосрочных прогнозов максимальных уровней воды  
на р. Енисей –с. Ярцево в 2005-2007 гг. (допустимая ошибка – 135 см)**

Год	Н <sub>мах</sub> , факт	Уравнение (5)		Уравнение (6)	
		Н <sub>мах</sub> , прогноз	ошибка	Н <sub>мах</sub> прогноз	ошибка
2005	1103	1079	24	1165	-62
2006	840	910	-70	849	-9
2007	1401	1348	53	1478	-77

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

Методика для прогноза максимального уровня воды р. Тасеева – пос. Машуковка испытывалась в отделе гидрологических прогнозов в 2005 – 2007 гг. В методике для пос. Машуковка использовались три уравнения [2].

В уравнениях используются следующие предикторы:

- запас воды в снеге;
- показатель пропускной способности русла;
- сумма осадков за март;
- изменение уровня воды за декаду.

Прогноз, рассчитанный по первому и второму уравнениям, выбирается в качестве основного с учетом сложившихся особенностей характера весны. Расчет по этим уравнениям производится в конце третьей декады марта.

В случае теплого или дождливого апреля третье уравнение используется как уточняющее в конце третьей декады апреля.

Результаты испытаний приведены в табл. ?.

**Результаты долгосрочных прогнозов максимальных уровней воды**

**р. Тасеева – пос. Машуковка (допустимая ошибка – 95 см)**

Год	Факт Н <sub>мах</sub>	Уравнение 1		Уравнение 2		Уравнение 3	
		Н <sub>мах</sub> прогноз	ошибка	Н <sub>мах</sub> прогноз	ошибка	Н <sub>мах</sub> прогноз	ошибка
2005	724	582	142	583	141	621	103
2006	750	739	11	750	0	752	-2
2007	610	568	42	548	62	528	82

Оправдываемость прогнозов по 1 уравнению – 2 / 3 – 67%

Оправдываемость прогнозов по 2 уравнению – 2 / 3 – 67%

Оправдываемость прогнозов по 3 уравнению – 2 / 3 – 67%

**Рекомендации о внедрении**

Учитывая положительные результаты производственных испытаний методов долгосрочного прогноза уровней воды (включая заторные) на участках нижнего течения Ангары и Среднего Енисея, а также на р. Тасеева – пос. Машуковка, Технический совет Среднесибирского УГМС в своём решении от 25 октября 2007 г. рекомендовал внедрить методы в оперативную практику Гидрометцентра Красноярского ЦГМС-Р в качестве основных расчётных на участках р. Енисей – с. Назимово, р. Енисей – с. Ярцево, р. Тасеева – пос. Машуковка.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Шуляковский Л. Г., Ерёмина В. А. К методике прогноза заторных уровней воды //Метеорология и гидрология.-1952.-№1.-С. 46-51.
2. Бураков Д. А., Космакова В. Ф., Младенцева Л. А., Кузнецова А. П. Метод долгосрочного прогноза уровней воды (включая уровни заторного происхождения) на участках среднего течения Енисея//Информационный сборник № 35.-2008.-С. 114-124.