

*Д.А. Бураков<sup>1</sup>, В.Ф. Космакова<sup>2</sup>,  
Н.П. Волковская<sup>3</sup>*

## **МЕТОДЫ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ НА РЕКЕ ИРТЫШ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИХ ИСПЫТАНИЯ**

*<sup>1</sup>Красноярский государственный аграрный университет, г. Красноярск;*

*<sup>2</sup>Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу  
окружающей среды, г. Красноярск;*

*<sup>3</sup>Обь-Иртышское управление по гидрометеорологии и мониторингу  
окружающей среды, г. Омск*

### **Введение**

Река Иртыш протекает с юга на север, пересекает границы трех государств: Китая, Казахстана и России. В период с 1976 по 1994 г. на территории Казахстана строилась и введена в эксплуатацию Шульбинская гидроэлектростанция, последняя в каскаде Верхне-Иртышских. Прогноз максимальных уровней выполнялся по методикам, выпущенным в 50–60 гг. XX века, основанных на расчете максимального талого стока от величины снегонакопления в бассейне реки. В настоящее время накоплен продолжительный ряд гидрометеорологических данных при зарегулированном режиме стока. Разработанные методы долгосрочного прогноза максимальных уровней воды по пунктам Черлак и Омск учитывают сбросы ГЭС и особенности вскрытия Иртыша. Методы испытаны в рамках выполнения инициативной темы Плана испытания и внедрения новых и усовершенствованных методов (технологий) гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов Росгидромета 2018 г., части II, п.п. 6.3.

### **Условия формирования стока**

Река Иртыш является одной из крупнейших рек Азии. Бассейн реки расположен на территории трех стран. Площадь бассейна Иртыша до города Омска составляет 769000 км<sup>2</sup>, из них только 321000 км<sup>2</sup> действующая площадь. Иртыш не принимает значительных

притоков от Шульбинской ГЭС до города Омска. Ниже створа гидроэлектростанции Иртыш протекает в субмеридианальном направлении по Казахскому мелкосопочнику и выходит на обширную Западно-Сибирскую равнину, в основном высотой 250–285 м. В рельефе бассейна данного участка реки сосредоточено множество мелких плоских понижений, формирующихся карстово-суффозионными процессами. Здесь река характеризуется частым делением русла на рукава, большим количеством островов, наличием мелей. Ширина долины колеблется от 5 до 19 км, а при подходе к Омску сужается до 2 км. В пойме много стариц и озер. Русло реки извилистое. Ширина изменяется по мере приближения к Омску от 200 до 900 м.

На водосборе Иртыша от Шульбинской ГЭС до Омска формируется континентальный климат под воздействием двух центров погоды – Атлантического и Азиатского. Плоский рельеф и открытость с севера и юга не препятствует глубокому проникновению в ее пределы воздушных масс как с севера, так и с юга. Поэтому в любой сезон года возможны резкие изменения погоды, переход от тепла к холоду, резкие колебания температуры от месяца к месяцу, от суток к суткам и в течение суток. Для рассматриваемой территории характерны суровая продолжительная зима, сравнительно короткое, но жаркое лето, короткие переходные сезоны – весна и осень, поздние весенние и ранние осенние заморозки, короткий безморозный период. Переходные периоды (весна и осень) кратковременны и протекают бурно, особенно весна. Март по своим поздним отрицательным температурам является зимним месяцем [9]. Весенний переход через 0 °С наступает в первой декаде апреля.

На водосборе Иртыша от границы Казахстана до Омска в настоящее время отмечается слабое повышение зимних температур, среднегодового и зимнего количества осадков, у Омска тенденция к увеличению количества осадков отмечается во все сезоны. Годовое количество осадков от южных границ Омской области до Омска возрастает от 320 до 420 мм. Зимний сезон отличается относительной сухостью. Из годового количества осадков на холодный период (ноябрь – март) приходится лишь около 20–30 % [5]. Особенностью южной части территории Омской области является большая вариация максимального запаса влаги в снежном покрове от 13 до 162 мм и большая вариация сроков наступления весны, превышающая месяц. Период снеготаяния в бассейне начинается в первой декаде марта-апреля и продолжается до второй декады мая. Разброс сроков начала периода снеготаяния составляет около месяца.

Водный режим Иртыша на участке от Черлака до Омска носит сложный характер, обусловленный трансформацией различных типов режима тех зон, через которые он протекает. Главной фазой водного режима реки является весеннее половодье, которое формируется в верхней горной части бассейна, за пределами рассматриваемой территории.

На период половодья с апреля по июль приходится большая часть годового стока. При этом существенное влияние на режим оказывают водохранилища Верхне-Иртышских ГЭС. На реке Иртыш сток зарегулирован тремя водохранилищами: Бухтарминским, Усть-Каменогорским, Шульбинским. Так, при естественном режиме и до введения в эксплуатацию Бухтарминской и Усть-Каменогорской ГЭС с 1891 по 1968 г. у Омска максимальные годовые уровни воды наблюдались во время вскрытия, с элементами заторов, в среднем один раз в 3–4 года, после 1968 г. весенние заторы льда на данном участке больше не образуются. Среднее многолетнее значение максимального за год уровня снизилось в сравнении с естественными условиями на 9 % у Черлака и на 36 % у Омска [6]. Максимальные уровни воды Иртыша в многоводные годы создают угрозу населению и хозяйственным объектам для населенных пунктов Черлак и Омск. При заторах льда в реке у Черлака возникает угроза подтопления рабочего поселка Затон, расположенного в пойме.

### **Описание методов прогноза максимальных уровней воды**

Высокий сток весенних половодий вызывается сочетанием следующих условий: дождливая осень, суровая зима, большое снегонакопление, запоздавшая холодная весна (реже – ранняя весна, но очень дружная) с большим количеством осадков, резкое установление теплой погоды. В последнем случае наводнения могут формироваться в результате интенсивного притока талых и дождевых вод. На исследуемом участке реки весенние заторы льда в период ледохода чаще всего не являются причиной формирования наивысших уровней воды весеннего половодья. Значительное влияние оказывает природоохранный сброс Шульбинской ГЭС, который делается ежегодно для затопления поймы Иртыша.

Методики долгосрочного прогноза максимальных уровней весеннего половодья опираются на физико-статистические зависимости, получаемые с применением регрессионного анализа, что вызвано трудностями строгого физико-математического описания процессов их формирования, их многофакторности, зависимости от будущих погодных условий, предсказание которых с необходимой заблаговременностью и точностью пока не представляется возможным. В основу физико-статистических моделей долгосрочного прогноза максимальных уровней воды положены исследования Л.Г. Шуляковского, который предложил для этой цели использовать регрессионные модели [1–5, 10].

Атмосферные процессы и связанные с ними процессы весеннего ослабления прочности ледяного покрова и прибыли воды в реках носят инерционный характер, т. е. начальные тенденции их развития характеризуют последующий ход вскрытия реки. Циркуляционные «предвестники» раннего или позднего весеннего потепления проявляются

еще в феврале-марте. Сибирский опыт показывает, что температура воздуха в марте (декадная, месячная) может приблизительно характеризовать тип весны. Например, при низкой температуре марта – начала апреля 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. Конкретный набор учитываемых факторов (предикторов) и вид регрессионных уравнений индивидуальны для каждого участка реки. Все используемые характеристики – это комплексные показатели взаимодействия атмосферы, бассейна и русла [1, 10]. На первом этапе отбор предикторов в прогностическое уравнение регрессии осуществлялось исходя из качественного анализа изучаемого явления. На втором этапе на основе анализа матрицы парных коэффициентов корреляции отсеяли незначимые переменные, если это не входит в противоречие с логикой изучаемого явления. Далее, на третьем этапе, на обучающей выборке рассчитываются оценки параметров модели с использованием метода пошаговой регрессии, а по данным контрольной выборки (5–10 % от общего объема наблюдений) оценивается качество построенной модели.

Для разработки методик прогноза максимальных уровней воды отделом гидрологических прогнозов ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС» создан электронный архив гидрометеорологических данных наблюдений за 1968–2017 гг. в бассейне исследуемого участка реки, который включает:

- характерные уровни воды за различные фазы водного и ледового режима;
- средние месячные расходы воды;
- средние по месяцам и декадам температуры воздуха;
- суммы осадков по месяцам и декадам;
- запасы воды в снежном покрове по данным снегомерных съемок;
- данные о толщине льда и сроках его установления;
- показатели осеннего увлажнения почвы.

Электронный архив данных по каждому бассейну включает несколько десятков характеристик (предикторов).

В расчетах использовались наблюдения за последние 27–50 лет с начала регулирования ежедневного стока Шульбинской ГЭС.

Линейное уравнение для прогноза имеет следующий общий вид:

$$H_{\text{макс}} = c_1 \times x_1 + c_2 \times x_2 + \dots + c_n \times x_n + b, \quad (1)$$

где  $b$  – свободный член ( $y$ -пересечение);  $c_i$  – коэффициенты регрессии при соответствующих предикторах.

Основные предикторы для прогноза максимального уровня у Черлака следующие:

- показатель наполнения русла и увлажнения бассейна (уровень воды в день появления ледовых явлений р. Иртыш у г. Омска,  $H_1$ );
- количество выпавших осадков в январе (на участке у г. Омск,  $x_1$ );
- показатель снегонакопления в бассейне (максимальный запас воды в снеге у Черлака,  $S_1$ );
- показатель суровости зимы (температура воздуха в декабре,  $t_{XII}$ , январе,  $t_I$ , у Черлака);
- показатель дружности весны бассейна (температура воздуха в апреле у Омска,  $t_{IV}$ );
- обеспеченная водность во время формирования максимального уровня (накопленная сумма среднесуточных расходов водоохранного сброса Шульбинской ГЭС,  $\sum Q_1$ ).

Формула прогноза максимальных уровней воды у Черлака приобретает вид:

$$H_{\text{макс Черлак}} = 0,503 \times S_1 + 0,00142 \times \sum Q_1 + 0,553 \times H_1 + 1,337 \times x_1 - 4,085 \times t_{XII} - 2,643 \times t_I - 6,862 \times t_{IV} + 419,992. \quad (2)$$

Для прогноза максимального уровня у Омска основными предикторами выбраны:

- показатель снегонакопления в бассейне (максимальный запас воды в снеге у Черлака,  $S_1$ );
- показатель суровости зимы (уровень воды на 31 марта в р. Иртыш у Омска,  $H_2$ );
- показатель увлажнения бассейна (среднемесячные расходы воды в январе на участке у Омска,  $Q_1$ );
- показатель дружности весны бассейна (температура воздуха в апреле у Омска,  $t_{IV}$ );
- обеспеченная водность во время формирования максимального уровня (накопленная сумма среднесуточных расходов водоохранного сброса Шульбинской ГЭС,  $\sum Q_1$ ).

Ниже приведены формулы (3), (4) для прогноза максимальных уровней воды у Омска:

$$H_{\text{макс Омск1}} = 0,273 \times S_1 + 0,205 \times Q_1 - 2,702 \times t_{IV} + 0,00314 \times \sum Q_1 - 28,376, \quad (3)$$

$$H_{\text{макс Омск2}} = 0,256 \times Q_1 - 2,132 \times t_{IV} + 0,0035 \times \sum Q_1 - 0,175 \times H_2 - 28,376. \quad (4)$$

## Оценка погрешности, эффективности и оперативности выпуска прогнозов

Оценка успешности методов прогноза максимальных уровней воды реки Иртыш проводилась согласно Методическим указаниям [8].

Из-за ограниченного числа прогнозов в период оперативных испытаний эффективность методик определяется в основном по результатам авторских испытаний на архивных материалах и результатам производственных испытаний за 2016–2018 гг. В табл. 1 приведены показатели точности прогностических зависимостей за период испытаний по формулам (2), (3), (4). Оправдываемость прогнозов, без учета уточнений, за тот же период по существующим методикам составила 82 % по пункту Черлак и 68 % по пункту Омск.

*Таблица 1*

**Оправдываемость прогноза максимальных уровней воды реки Иртыш за период испытания  
на архивном материале и оперативных данных**

Пункт	Авторские испытания (1989–2015 гг.)		Производственные испытания (2016–2018 гг.)		Весь период испытания (1989–2018 гг.)	
	кол-во прогнозов	оправдывае- мость, %	кол-во прогнозов	оправдывае- мость, %	кол-во прогнозов	оправдывае- мость, %
Черлак	27	89	3	100	30	90
Омск	27	100	3	67	30	97
	27	100	3	67	30	97

Анализ оправдываемости прогнозов максимальных уровней воды реки Иртыш по пунктам Черлак (2) и Омск (3), (4) показал, что по результатам проверки (1989–2018 гг.) в целом методы обеспечили хороший и отличный результат – оправдываемость 90–97 % (табл. 1). Общая оценка качества методов прогноза проводилась согласно Наставлению [7] и составила  $S/\sigma = 0,359-0,483$ , что характеризует их как качественные. По формулам прогноза по пункту Омск (3), (4) результаты оценки качества очень близки и приведены в табл. 2 одной строкой. Оправдываемость прогноза за период оперативных испытаний показана в табл. 3. В 2018 году по пункту Омск прогноз был менее успешен из-за недоучета дополнительно выпавших осадков на водосборе во время формирования максимума (осадки в виде дождя в апреле и мае превысили среднеголетние значения на 45–112 %).

Показатели точности прогноза максимальных уровней воды р. Иртыш

Пункт	S/σ	σ <sub>Δ</sub> , см	R	R-квадрат	Нормированный R-квадрат	S, см
Черлак	0,483	52	0,914	0,83	0,774	25
Омск	0,392	42	0,933	0,87	0,846	24

*Примечание.* S/σ – критерий качества методик; σ<sub>Δ</sub> – допустимая ошибка прогноза; R – множественный коэффициент корреляции; R-квадрат – коэффициент детерминации; S – стандартная ошибка.

Таблица 3

**Оправдываемость прогноза максимальных уровней воды реки Иртыш за период испытания на независимом материале 2016-2018 гг.**

Год	Фактический уровень, см	Прогноз, см		Ошибка прогноза, см	
<b>р. Иртыш – р.п. Черлак (допустимая ошибка ряда наблюдений 42 см)</b>					
2016	610	576		34	
2017	637	630		7	
2018	589	614		-25	
<b>р. Иртыш – г. Омск (допустимая ошибка ряда наблюдений 53 см)</b>					
2016	341	309	312	32	29
2017	366	316	321	50	45
2018	296	241	240	55	56

### Заключение

Разработанные методы долгосрочного прогноза максимальных уровней воды в реке Иртыш у пунктов Черлак и Омск показали высокое качество прогнозов и отличную оправдываемость при выполнении испытаний. Методы прогнозов были внедрены в оперативную практику отдела гидрологических прогнозов Гидрометцентра ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС» в январе 2019 года в качестве основных.

### Список литературы

1. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 198 с.
2. Бузин В.А. Методы прогнозов зажорных и заторных явлений // Труды пятого всесоюзного гидрологического съезда. Том 7. – Л.: Гидрометеиздат, 1989.

3. Бураков Д.А., Космакова В.Ф. Метод прогноза максимальных уровней весеннего половодья реки Томи у г. Томска и результаты его применения на практике // Материалы Международной научно-практической конференции, 16–20 октября 2012 г., Томск, 2012. С. 69–71.

4. Бураков Д.А., Космакова В.Ф., Гордеев И.Н. Результаты испытания физико-статистического метода долгосрочного прогноза максимальных уровней воды весеннего половодья р. Енисей у г. Кызыл // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2012. – Информационный сборник № 39. С. 121–126.

5. Волковская Н.П., Мезенцева О.В. Оценка влияния динамики годовых сумм осадков на зимний сток рек Омской области // Материалы Международной научно-практической конференции «Инновационное развитие современной науки: проблемы и перспективы» [Эл. ресурс]. – Астана: Баспасы «Академия», 2017. – С. 228–237.

6. Волковская Н.П. Наводнения на реках Омской области // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. – 2017. – № 1 (8). – С. 1–7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28882632>.

7. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 193 с.

8. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 150 с.

9. Ресурсы поверхностных вод СССР. Алтай и Западная Сибирь. Т. 15. Вып. 3. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. С. 8–64.

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