



УДК 556.06

О.Э. Петкун

**ПРОГНОЗЫ ПРИТОКА ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ КРАСНОЯРСКОЙ ГЭС – ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ ЕНИСЕЙСКОГО ТОПЛИВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

*В статье рассмотрены физико-статистические зависимости для прогноза притока воды в водохранилище Красноярской ГЭС. На основе изучения гидрологического режима рек бассейна Красноярского водохранилища разработана методика и дана оценка точности прогноза.*

**Ключевые слова:** водохранилище, гидрологический режим, прогноз, метод линейной множественной регрессии, метод построения прогностических моделей.

O.E. Petkun

**FORECASTS OF THE WATER INFLOW INTO THE KRASNOYARSK HYDROPOWER ELECTRIC STATION RESERVOIR - FUNDAMENTALS OF THE HYDROPOWER RESOURCE CONTROL OF THE YENISEY FUEL AND ENERGY COMPLEX**

*The physical and statistical dependences for the forecast of water inflow into the reservoir of the Krasnoyarsk hydropower electric power station are considered in the article. Based on the study of the hydrological regime of the Krasnoyarsk reservoir basin rivers the methodology is developed and the forecast accuracy assessment is given.*

**Key words:** reservoir, hydrological regime, forecast, method of linear multiple regression, method for developing forecast models.

**Введение.** За последние годы доля ГЭС в общей выработке электроэнергии заметно возросла. От эффективности работы гидроэнергетической отрасли зависит устойчивость развития народного хозяйства в целом. Для нормальной эксплуатации ГЭС необходимы долгосрочные прогнозы притока воды в водохранилища, на основании которых задаётся общий режим работы ГЭС на длительный период. Для расчёта притока необходимо определять практически все компоненты водного баланса водохранилища. Оптимальное регулирование стока рек выполняется в целях максимальной выработки энергии и в обеспечении интересов сторонних водопользователей. В настоящее время все крупные гидроэлектростанции связаны в единую энергосистему, зачастую работают в каскадах. Планирование их работы производится с учётом удовлетворения самых различных, порой противоречивых требований многочисленных отраслей народного хозяйства. Для минимизации холостых сбросов избытка воды через плотину необходимо на основе гидрологических прогнозов притока воды разработать соответствующий график оптимального режима работы ГЭС.

Рассмотрим гидрологический режим [4] рек бассейна Красноярского водохранилища. Приток воды в водохранилище осуществляется в основном за счет Енисея – 54,5 %, Абакана – 14, Тубы – 26,5 % и небольших притоков, впадающих в водохранилище, – 5 %. Общий приток воды к створу ГЭС составляет около 88 км<sup>3</sup> с отклонением в многоводные годы до 120 км<sup>3</sup>, в маловодные 60–70 км<sup>3</sup>. За период весеннего половодья (апрель-июнь) в водохранилище поступает около 50 % годового стока, в летний период (июль-август) – 27, осенью (сентябрь-октябрь) – 17, за зиму (ноябрь-март) – 6 %.

Большинство рек, впадающих в водохранилище, берет начало в горах Саян, питание их осуществляется преимущественно за счет таяния снега и дождевых паводков. Значительные уклоны и подстилающие скальные породы способствуют быстрому стеканию поступившей влаги, а глубокий врез русел горных рек обеспечивает полный перехват просочившейся в грунт влаги. В связи с этим модули стока в горных районах большие. Так, в верховьях рек Абакана они составляют 20–25 л/с·км<sup>2</sup>, в бассейне Тубы – 35–40, в районах Верхнего Енисея – 10–15 л/с·1 км<sup>2</sup> [2].

По характеру половодья и режиму стока в течение года горные реки бассейна Енисея (Туба, Абакан, Оя, Сыда, Сисим) можно отнести по классификации Б.Д. Зайкова к алтайскому типу. Большинство рек пита-

ется за счет весенне-летнего таяния снегов, летне-осенних дождей и подземных вод. Большая часть рек отличается невысоким и растянутым, имеющим гребенчатый вид, половодьем, вызванным одновременным таянием на разных высотах и летними осадками, повышенным летне-осенним стоком и низким стоком зимой.

Вскрытие рек происходит обычно в середине апреля, причем подъем воды начинается подо льдом. В ряде лет при вскрытии образуются заторы, вызывающие большие подъемы уровня. Половодье на Абакане и Тубе проходит обычно с апреля по июнь в виде нескольких волн. Наивысший уровень половодья наблюдается в конце мая – начале июня. В течение летне-осеннего периода проходит ряд дождевых паводков.

В осенний период, перед ледоставом, на многих реках наблюдается шугоход в течение 15–30 дней. Во второй половине октября начинается ледоход, к концу которого уровни достигают низшего в году положения. Ледостав наступает обычно в середине ноября, в начале ледостава происходит резкий подъем уровней, который сменяется плавным понижением его до весны. После установления ледостава русла этих рек подо льдом остаются значительно зашугованными, что понижает точность измеренных расходов воды осенью и в первые месяцы зимы.

Внутригодовое распределение стока на реках крайне неравномерное. Наибольший сток наблюдается в мае-июне, когда проходит половодье. В последующие месяцы сток постепенно уменьшается, достигая наименьших величин в зимние месяцы.

На территории, примыкающей к Красноярскому водохранилищу (Минусинская котловина, степная и лесостепная часть Хакасии по левобережью), протекают малые реки Тесь, Биря, Ерба и другие. Режим этих рек отличен от режима вышеприведенных горных рек. Степные и лесостепные районы сложены легкопроницаемыми породами и имеют малые уклоны, что способствует задержанию влаги и уменьшению стока.

Половодье на этих реках проходит в апреле, когда происходит таяние снега на самых низких зонах. Формирование половодья идет в виде одной дружной волны с относительно высоким максимумом, резким подъемом и спадом, после чего устанавливаются очень малые расходы (0,1–0,01 м<sup>3</sup>/с).

Влияние дождей в летний период на малых реках очень незначительное. Благодаря малым уклонам, распаханности земель по большой территории, хорошей фильтрации песчаных и супесчаных почв, большинство дождевой влаги идет на фильтрацию и испарение, почти не формируя дождевого стока [4].

**Цель исследований.** Разработать методику долгосрочного прогноза притока воды в Красноярское водохранилище на второй квартал.

**Методы и результаты исследований.** Рассмотрим два подхода к прогнозу поступления речного стока в Красноярское водохранилище. Первый подход – метод линейной множественной регрессии с выбором аргументов и оценкой весовых коэффициентов с использованием *t*-статистик, что позволяет количественно оценить вклад основных стокоформирующих факторов [5]. В результате получено уравнение для прогноза притока воды в Красноярское водохранилище за второй квартал, включающее данные наблюдений наиболее информативных станций и постов сети Росгидромета за снежным покровом, весенними осадками, средней декадной температурой, определяющими особенности развития половодья. Уравнения прогноза имеют вид:

- для выпуска прогноза в конце марта:

$$Q_{пр} = S_{общ} \cdot 7.014 + X_{III} \cdot 10.33 - T_{III} \cdot 11.4 + 875.11, \quad (R=0,89); \quad (1)$$

- для уточнения прогноза 20 апреля:

$$Q_{пр} = S_{общ} \cdot 8.84 + X_{общ} \cdot 29.97 + T_{общ} \cdot (-1.78) + 802.62, \quad (R=0,92), \quad (2)$$

где  $S_{общ}$  – запас воды в снежном покрове на 20 марта по 6 пунктам снегомерных съемок (для формулы (1) – станции Оленья речка, Усинский тракт 12-18, Неожиданный прииск, для формулы (2) – Усинский тракт 2-14; Артемовск, Курагино);  $X_{общ}$  – весенние осадки за соответствующий период по 4 информационным пунктам наблюдений (для формулы (1) – сумма температур за март в пункте Артемовск; для формулы (2) – сумма осадков за апрель в пункте Сосновка; за 3 декаду марта в пункте Сосновка; за апрель в пункте Туран);  $T_{общ}$  – средняя температура воздуха, рассчитанная по данным наблюдений в 3 пунктах за соответствующие периоды (для формулы (1) – сумма температур за март в пункте Артемовск; для формулы (2) – сумма температур за 2 декаду марта в пункте Оленья речка, за 2 декаду апреля в пункте Туран). Расчеты представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Прогноз притока воды в водохранилище Красноярской ГЭС за II квартал

Допустимая ошибка $\rho_x = 446 \text{ м}^3/\text{с}$							
Формула (1)				Формула (2)			
Прогноз, $\text{м}^3/\text{с}$	Факт, $\text{м}^3/\text{с}$	Ошибка, $\text{м}^3/\text{с}$	Ошибка, %	Прогноз, $\text{м}^3/\text{с}$	Факт, $\text{м}^3/\text{с}$	Ошибка, $\text{м}^3/\text{с}$	Ошибка, %
3641	3570	71	2	3650	3570	80	2,5

Таким образом, метод линейной множественной регрессии [5] в 2013 г. дал прогнозируемое значение притока в Красноярское водохранилище 3641 (формула (1)) и 3650  $\text{м}^3/\text{с}$  (формула (2)). Фактический приток составил 3570  $\text{м}^3/\text{с}$ . Фактические ошибки прогноза притока по формулам (1) и (2) соответственно равны 71 и 80  $\text{м}^3/\text{с}$  (допустимая ошибка 446  $\text{м}^3/\text{с}$ ), т.е. прогноз оправдался по обеим формулам.

Второй подход – это метод построения прогностических моделей, разработанный А.В. Игнатовым (Институт географии СО РАН). Метод моделирования, заложенный в программу, опирается на математический аппарат теории вероятностей и математической статистики [3]. Результаты прогноза с помощью данного метода приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Прогноз притока воды в водохранилище Красноярской ГЭС за II квартал по методу А.В. Игнатова

Допустимая ошибка $\rho_x = 446 \text{ м}^3/\text{с}$							
Вариант 1				Вариант 2			
Прогноз, $\text{м}^3/\text{с}$	Факт, $\text{м}^3/\text{с}$	Ошибка, $\text{м}^3/\text{с}$	Ошибка, %	Прогноз, $\text{м}^3/\text{с}$	Факт, $\text{м}^3/\text{с}$	Ошибка, $\text{м}^3/\text{с}$	Ошибка, %
3649	3570	79	2	3607	3570	37	1

Данные табл. 2 показывают, что метод А.В. Игнатова [3] дал в 2013 г. прогнозируемое значение притока в Красноярское водохранилище 3649 (вариант 1) и 3607  $\text{м}^3/\text{с}$  (вариант 2). Фактический приток составил 3570  $\text{м}^3/\text{с}$ . Фактические ошибки прогноза притока по вариантам 1 и 2 равны соответственно 79 и 37  $\text{м}^3/\text{с}$  (допустимая ошибка 446  $\text{м}^3/\text{с}$ ), т.е. прогноз оправдался по двум вариантам.

**Заключение.** Прогнозы притока воды в Красноярское водохранилище во втором квартале 2013 г. на основе разработанных методик оправдались на независимом материале. Авторские расчеты, выполненные на зависимом материале (45 лет) [1], показали достаточно высокие показатели качества методики прогноза.

## Литература

1. Гидрологические ежегодники. Бассейн Енисея. – Обнинск, 1965–2012. – 360 с.
2. Бураков Д.А., Гордеев И.Н. Оценка предвесенних снегозапасов в бассейнах Красноярского и Саяно-Шушенского водохранилищ // География и природные ресурсы. – 2013. – № 1. – С. 72–78.
3. Игнатов А.В. Учебное пособие по программе «Modelling». – М., 2010. – 234 с.
4. Годовые отчеты ОАО «Красноярская ГЭС» за 2004–2010 гг. – Красноярск, 2004–2010.
5. Попов Е.Г. Гидрологические прогнозы. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 256 с.