

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ПРОГНОЗА ЕЖЕДНЕВНОГО БОКОВОГО ПРИТОКА В БОГУЧАНСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

*Авторами статьи на основе данных о стоке рек-аналогов произведен расчет и разработан метод краткосрочного прогноза ежедневного бокового притока в водохранилище Богучанской ГЭС. Прогноз бокового притока выполнен с применением программного обеспечения физико-математической модели Д.А. Буракова.*

**Ключевые слова:** весеннее половодье, боковой приток воды, реки-аналоги, гидрологические прогнозы.

*D.A. Burakov, L.A. Putintsev*

## THE CALCULATION AND THE FORECAST METHODS OF THE DAILY SIDE INFLOW INTO BOGUCHAN RESERVOIR

*The calculation is made and the method of the short-term forecast of the daily side inflow into the Boguchan hydroelectric power station reservoir is developed by the authors of the article on the basis of the river-analogs flow-ing data. The side inflow forecast is done with the application of the physical-mathematical model software by D.A. Burakov.*

**Key words:** spring flood, waterside inflow, hydrological forecasts.

---

**Введение.** Летом 1988 г. обильные ливневые дожди обусловили быстрое наполнение Красноярского водохранилища, что привело к наводнению на Енисее, ущерб от которого составил около 60 млн долл. Если предположить, что боковой приток в Богучанское водохранилище достигнет однопроцентной обеспеченности (6100 м<sup>3</sup>/с), то с учетом сбросов Усть-Илимской ГЭС Богучанское водохранилище за сутки может быть заполнено на четверть своей полезной емкости. Таким образом, в условиях ограниченной регулирующей емкости водохранилища краткосрочные прогнозы бокового притока исключительно важны, так как на их основе осуществляется регулирование сбросов воды через плотины каскада ангарских ГЭС, обеспечивающих предотвращение переполнения Богучанского водохранилища в многоводные периоды.

Этот и другие примеры доказывают актуальность разработки методов гидрологических прогнозов, необходимых для своевременного предупреждения об опасных и неблагоприятных гидрологических явлениях.

**Цель исследований.** Усовершенствование способов расчета и прогноза бокового притока в Богучанское водохранилище.

**Задачи исследований.** Изучить достоинства и недостатки существующих способов расчета бокового притока, а также условия их применения в условиях Сибири; разработать модель для расчета бокового притока в водохранилище с учетом расчетов для водохранилища Богучанской ГЭС; найти способы краткосрочного прогноза бокового притока.

**Материалы и методы исследований.** Основными методами исследований являются методы водного баланса и гидрологической аналогии, которые в настоящее время широко применяются в практике гидрологических расчетов.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В основу настоящей статьи положены данные гидрометеорологических наблюдений сети станций и постов Среднесибирского и Иркутского УГМС, фондовые материалы, публикации, крупномасштабные топографические карты.

Ангара – крупнейший приток Енисея, уникальной реки нашей страны. Её отличительной чертой является естественная зарегулированность речного стока озером Байкал. Это обстоятельство, а также благоприятные топографические и экологические условия, приводят к тому, что каскад ГЭС на Ангаре по технико-экономическим показателям является наиболее эффективным в России.

Боковой приток в рассматриваемое водохранилище формируется с площади 47000 км<sup>2</sup> на участке между плотинами Усть-Илимской и Богучанской ГЭС. Отметка нормального подпорного уровня водохранилища составляет 208,0 м, расчетный напор при НПУ – 65,5 м, площадь зеркала при НПУ – 2326 тыс. км<sup>2</sup>. Водоохранилище осуществляет суточное регулирование стока Ангары и сезонное регулирование боковой приточности, колебания уровня водохранилища в течение года не превысят 1 м.

Богучанское водохранилище располагается на территории Кежемского административного района Красноярского края и Усть-Илимского района Иркутской области. Диапазон высот в бассейне бокового притока водохранилища от 208 до 650 м, преобладают высоты 208–400 м. Возвышенная часть бассейна располагается на востоке водохранилища, между Ангарой и Подкаменной Тунгуской, высота водораздельной линии колеблется от 400 до 600 м. По правобережью р. Ковы (левый приток р. Ангары) тянется Ковинский кряж с высотами до 650 м. Южнее к Ковинскому кряжу примыкает Бирюсинское плато с высотами 450–550 м.

Рассматриваемая территория характеризуется холодными зимами с преобладающей малооблачной безветренной погодой. Лето в среднем теплое, короткое. Климат резко континентальный. В среднем по бассейну выпадет около 400 мм осадков в год. В северо-восточной части района на наветренных склонах Заангарского плато (верхнее течения р. Чадобец) выпадает наибольшее количество осадков в бассейне (450–500 мм). Годовой ход сумм месячных осадков хорошо выражен: наименьшее количество выпадает в феврале и марте (10–20 мм), наибольшее – в августе (около 60 мм). Средняя за многолетний период высота снежного покрова на левом берегу Ангары не превышает 50 см, в пределах правобережья она достигает 75–80 см.

Исследуемая территория находится в пределах Приангарского плато, в зоне южной тайги, с преобладанием светлохвойного леса с наибольшим распространением сосны [1]. Только в северо-западной части бассейна встречается темнохвойная тайга, представленная еловыми, кедровыми и пихтовыми лесами. В бассейне Богучанского водохранилища самыми значительными реками являются Кова, Тушама, Ката и Едарма. Методика расчета и прогноза притока воды в Богучанское водохранилище, разработанная в отделе гидрологических прогнозов Среднесибирского УГМС в 80-х гг., требует коренной переработки ввиду закрытия за последние 20 лет большинства гидрометеорологических пунктов наблюдений.

В основу ретроспективного расчета бокового притока положены материалы наблюдений за расходами воды малых рек за 1977–1987 гг., бассейны которых располагаются непосредственно на площади водосбора бокового притока. В пределах этой площади выделено три района (рис. 1). В каждом районе определены реки-аналоги, бассейны которых можно рассматривать в качестве ландшафтно-гидрологических индикаторов в соответствующих районах («бассейны-индикаторы» по А.В. Огиевскому).

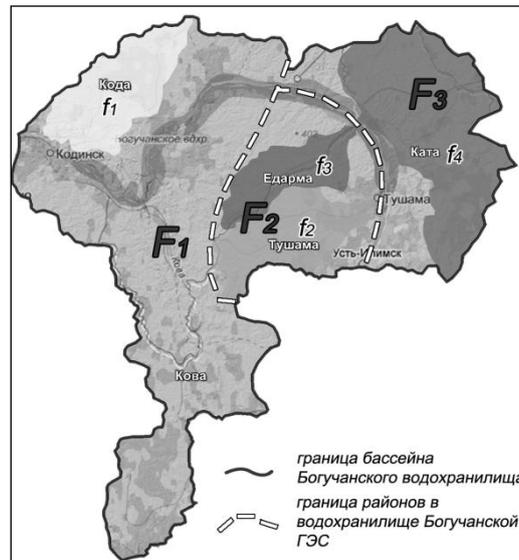


Рис. 1. Районы и бассейны рек Богучанского водохранилища

Коэффициенты приведения стока бассейнов-аналогов к величинам стока районов определялись через отношения площади районов к соответствующим площадям бассейнов. Исходя из принятой схемы, суточные величины бокового притока в водохранилище Богучанской ГЭС за 1977–1987 годы рассчитаны по формуле:

$$Q_{бок}(t) = Q(t)_{Кода} \left( \frac{F_1}{f_1} \right) + \left[ \frac{Q(t)_{Едарма} + Q(t)_{Тушама}}{2} \right] \left( \frac{F_2}{f_2 + f_3} \right) + Q(t)_{Ката} \left( \frac{F_3}{f_4} \right) + 300, \quad (1)$$

где  $Q_{бок}(t)$  – расход воды бокового притока;  $F1, F2, F3$  – площади районов;  $f1, f2, f3, f4$  – площади водосборов рек-аналогов;  $Q(t)_{Кода}, Q(t)_{Едарма}, Q(t)_{Тушама}, Q(t)_{Ката}$  – расходы воды бассейнов-аналогов: р. Кода – 7 км от устья, р. Едарма – д. Едарма, р. Тушама – д. Тушама, р. Ката – д. Ката.

Формула (1) учитывает дополнительное подземное питание реки Ангары подземными водами за счет превышения вреза её речной долины по сравнению с менее глубоким врезом долин малых рек. На основе расчета баланса расходов воды с использованием наблюдений в створе Усть-Илимской ГЭС и у пос. Сыро-молотово (створ плотины Богучанской ГЭС) и наблюдений по рекам-аналогам, средний суточный расход воды дополнительного подземного притока принят равным  $300 \text{ м}^3/\text{с}$ . Рассчитанные таким образом за 10 лет величины суточных расходов воды бокового притока  $Q_{бок}(t)$  являются исходными в дальнейшем анализе.

В настоящее время наблюдения за расходами воды проводятся только на двух малых реках: 1)  $Q_{ч}(t)$  – р. Чадобец – пос. Яркино; 2)  $Q_{м}(t)$  – р. Мура – пос. Ирба. Рассмотрим ландшафтно-гидрологические характеристики этих бассейнов.

*Река Мура* (левый приток р. Ангары) берет свое начало в пределах Бирюсинского плато. Восточная часть бассейна имеет общую водораздельную линию с бассейном Богучанского водохранилища. Высота у истоков реки составляет около 450 м, в районе устья – 150 м. Средняя высота водосбора 320 м. В среднем и нижнем течении располагается Мурская низина, граничащая с бассейном Ковы. В бассейне реки Мура 85 % площади занимают массивы темнохвойной тайги. Почвы в бассейне в основном дерново-позолистые. Механический состав разнообразен. В верхнем и среднем течении до впадения р. Чудоба (правый приток р. Муры) распространены песчаные и легкосуглинистые почвы, ниже по течению они сменяются хрящеватыми. Растительность представлена преимущественно сосновыми средне- и южнотаежными лесами. Безлесные участки составляют 15 %, они встречаются в районе пос. Ирба и у устья р. Чудоба.

*Река Чадобец* (правый приток р. Ангары) имеет площадь бассейна  $13\,700 \text{ км}^2$ . Берет начало в восточных склонах Тунгусского хребта близ истоков р. Подкаменной Тунгуски. В районе истока высоты составляют около 600 м, в устье 150 м, средняя высота водосбора 390 м. Юго-восточная граница бассейна имеет общий водораздел с бассейном Богучанского водохранилища. Высоты на этом участке составляют 350–550 м. Почвы в бассейне в основном дерново-позолистые, в верхнем течении преобладают мерзлотно-таежные. Механический состав представлен хрящеватыми (щебнистыми) почвами, залегающими на древних аллювиально-делювиальных отложениях. Основным типом растительности являются темнохвойные леса, которые занимают около 95 % бассейна.

Бассейны рек Мура и Чадобец располагаются на небольшом удалении от бассейна бокового притока в Богучанское водохранилище (рис. 2) и характеризуются подобными ландшафтно-гидрологическими условиями, что послужило основанием рассматривать их в качестве бассейнов-аналогов. Действительно, используя материалы наблюдений по стоку рек Мура и Чадобец, удалось получить достаточно тесную корреляционную зависимость с расходами воды бокового притока, рассчитанного по формуле (1).

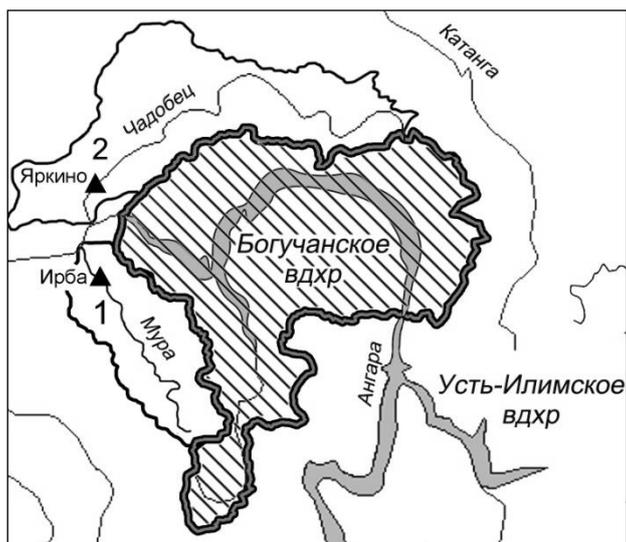


Рис. 2. Схема расположения рек-аналогов: 1 – бассейн реки Чадобец; 2 – бассейн реки Мура

В результате получено уравнение, позволяющее рассчитывать боковой приток с использованием материалов наблюдений по указанным рекам:

$$Q_{бок}(t) = 3,07 \times Q_m(t) + 1,64 \times Q_ч(t) + 1,2 \times [(Q_ч(t) - Q_ч(t-1))] + 349, \quad (2)$$

где  $Q_{бок}$  – среднесуточный расход воды бокового притока в Богучанское водохранилище;  $Q_m, Q_ч$  – среднесуточные расходы воды соответственно на г/п: р. Мура – пос. Ирба, р. Чадобец – пос. Яркино. Поясним, что выражение  $[(Q_ч(t) - Q_ч(t-1))]$  в уравнении (2) характеризует тенденцию (изменение за сутки) расходов воды реки Чадобец, учет которой повышает тесноту связи.

Коэффициент множественной корреляции полученной зависимости  $R$  равен 0,966;  $t$ -статистики коэффициентов регрессии превышают 9,0, т.е. стандартные ошибки коэффициентов регрессии существенно меньше значений этих коэффициентов.

Другой способ расчета бокового притока основан на уравнении квазиустановившегося движения воды [2], устанавливающего связь между расходами воды верхнего и нижнего створов на заданном участке реки. В этом случае уравнение для прогноза суточного притока  $Q_{бок}(t)$  получает вид:

$$Q_{бок}(t) = \int_0^L q dl = Q_n(t) - Q_b(t-\tau), \quad (3)$$

где  $Q_n(t)$  – расход воды ( $m^3/c$ ) в створе плотины Богучанской ГЭС (пос. Сыромолотово, нижний створ);  $Q_b(t-\tau)$  – сбросы Усть-Илимской ГЭС (верхний створ);  $q$  – элементарный боковой приток на единицу длины в единицу времени на участке реки Ангары между плотинами Богучанской и Усть-Илимской ГЭС ( $m^3/m \times c$ );  $L$  – длина участка Ангары между Усть-Илимской и Богучанской ГЭС;  $\tau$  – сдвигка на время добегания.

Расчитанный за 1977–1987 гг. по уравнению (3) суточный боковой приток сопоставлен с полученными выше значениями притока по формуле (1). Оказалось, что сдвигка на время добегания  $\tau$  составляет 4 сут, что примерно равно времени добегания на участке реки Ангары от плотины Усть-Илимской ГЭС до пос. Сыромолотово (360 км). Заметим, что весенние расходы воды при подвижках льда и во время ледохода не учитывались из-за низкой точности подсчета стока в пос. Сыромолотово при наличии ледовых явлений.

Расходы бокового притока, определенные по формулам (1) и (3), практически совпали, что вытекает из подобия условий формирования водного режима рассматриваемых рек-аналогов и подтверждает надежность расчета бокового притока по формулам (1)–(2). Итак, формула (2) может использоваться для расчета бокового притока за период 1977–2012 гг. и в последующие годы.

Разработка методики прогноза бокового притока предусматривает оценку бокового притока по материалам многолетних наблюдений; адаптацию программного обеспечения математической модели прогноза, используемой в сибирских УГМС (модель Д.А. Буракова [3]). Прогноз бокового притока выполнен с применением программного обеспечения математической модели. Принципы построения модели и ее структура показаны на рис. 3–4 [3].



Рис. 3. Принципы построения модели прогноза

Использовались данные о запасах воды в снежном покрове по результатам снегомерных съемок, показатель осеннего увлажнения (сток р. Чадобец за октябрь в предшествующем году), наблюдения за температурой воздуха.

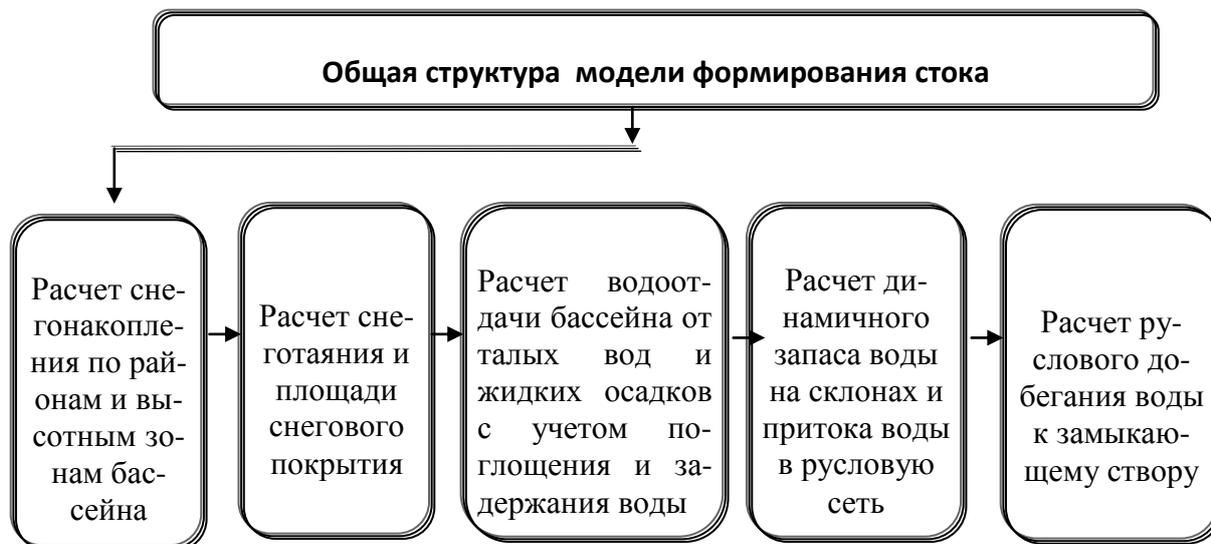


Рис. 4. Структура модели прогноза

Оптимизация неизвестных параметров модели выполнялась по данным многолетних наблюдений, что позволило установить значение скоростей добега, параметров поглощения и задержания талой и дождевой воды в бассейне, коэффициенты стаивания, высотные градиенты температуры воздуха и осадков и др.

**Заключение.** Применение модели краткосрочного или среднесрочного прогноза считается эффективным, если средняя квадратичная ошибка прогноза ( $S$ ) меньше среднего квадратичного отклонения ( $\sigma$ ) предсказываемой величины за период заблаговременности прогноза. Приемлемой считается методика прогноза, для которой соотношение  $S/\sigma$  не превышает 0,8, причем при  $S/\sigma < 0,5$  качество методики «хорошее», при 0,5–0,8 – «удовлетворительное». При  $S/\sigma$  от 0,8 до 1,0 методика «неудовлетворительная». Расчеты, выполненные по материалам независимых наблюдений, дали критерии качества  $S/\sigma$  от 0,38 до 0,50 при заблаговременности прогноза от 1 до 5 сут, что указывает на «хорошую» оценку качества методики прогнозов.

### Выводы

1. Бассейны рек Мура и Чадобец по условиям формирования стока являются репрезентативными аналогами для бассейна бокового притока в Богучанское водохранилище.
2. Используя материалы наблюдений по стоку этих рек, удалось получить ежедневный боковой приток в водохранилище и адаптировать концептуальную математическую модель его краткосрочного прогноза.
3. Полученные оценки качества модели прогноза позволяют рекомендовать её для использования в оперативной практике Гидрометцентра Среднесибирского УГМС.

### Литература

1. Раковская Э.М., Давыдова М.И. Физическая география России. – М.: Владос, 2001. – Ч. 2. – 174 с.
2. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 418 с.
3. Бураков Д.А., Адамович А.А. Долгосрочные прогнозы притока воды в водохранилища енисейских ГЭС с применением математической модели // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 1. – С. 95–105.

