

УДК 556.06; 556.166; 556; 512

## КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ БОКОВОГО ПРИТОКА ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ БОГУЧАНСКОЙ ГЭС

**Бураков Дмитрий Анатольевич<sup>1</sup>,**  
daburakov@yandex.ru

**Путинцев Лев Александрович<sup>2</sup>,**  
leo77789@mail.ru

<sup>1</sup> Институт землеустройства, кадастров и природообустройства Красноярского государственного аграрного университета, Россия, 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 90.

<sup>2</sup> ФГБУ «Среднесибирское УГМС», Россия, 660049, г. Красноярск, ул. Сурикова, 28.

**Актуальность работы.** Богучанская гидроэлектростанция на р. Ангаре, введенная в эксплуатацию в 2014 г., является одним из наиболее крупных объектов гидротехнического строительства в Восточной Сибири. Она предназначена для покрытия дефицита растущего энергопотребления в связи с развитием в регионе Нижнего Приангарья энергоёмких производств. При проектном режиме работы ГЭС уровень водохранилища должен изменяться в пределах  $\pm 0,5$  м. При таком незначительном изменении уровня для предотвращения ситуаций, связанных с переполнением Богучанского водохранилища, требуются надежные краткосрочные прогнозы бокового притока воды. Между тем, методика расчета и прогноза бокового притока воды, разработанная в Среднесибирском УГМС в 80-х гг., устарела как в научно-методическом отношении, так и вследствие закрытия за последние 20 лет большинства пунктов гидрометеорологических наблюдений на нижней Ангаре. Все это определяет актуальность выполненной работы.

**Цель работы:** реализация математической модели формирования речного стока в ландшафтно-гидрологических условиях бассейна водохранилища Богучанской ГЭС для краткосрочных (1–7 суток) прогнозов бокового притока.

**Методы исследования:** метод водного баланса, географо-гидрологический метод, математическое моделирование процессов формирования стока.

**Результаты.** Проведена адаптация математической модели формирования водного стока на основе интеграла свертки для целей краткосрочного прогноза притока воды в Богучанское водохранилище. Рассмотрена ландшафтно-гидрологическая основа, обеспечивающая реализацию модели. Выполнена оценка запасов воды в снежном покрове на территории бассейна бокового притока, использующая наземные снегомерные съемки Росгидромета и спутниковую информацию о динамике заснеженности. Обоснован комплексный показатель водопроницаемости почв бассейна, учитывающий осеннее увлажнение и промерзание почвогрунтов. Разработана технология краткосрочного прогноза суточного бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС.

### Ключевые слова:

Весеннее половодье, концептуальная модель формирования стока, гидрологические прогнозы, Богучанская ГЭС, боковой приток.

### Объект исследования

Створ плотины Богучанского гидроузла расположен в 444 км от устья р. Ангары и на 375 км ниже Усть-Илимской ГЭС. Диапазон высот в бассейне бокового притока водохранилища от 208 до 650 м, преобладают высоты 208–400 м. Возвышенная часть бассейна располагается на востоке, между реками Ангарой и Подкаменной Тунгуской. В бассейне Богучанского водохранилища самыми значительными реками являются Кова, Тушама, Ката и Едарма.

Рассматриваемая территория характеризуется холодными зимами с преобладающей малооблачной и безветренной погодой. Лето в среднем теплое, короткое. Годовое количество осадков в пределах бассейна водохранилища уменьшается с северо-востока на юго-запад от 500 до 350 мм. Наименьшие значения сумм осадков в бассейне наблюдаются в межгорной долине Ангары. Средняя за многолетний период высота снежного покрова на левобережье Ангары не превышает 50 см, в пределах правобережья она достигает 75–80 см.

Исследуемая территория находится в зоне южной и средней тайги с преобладанием светлохвойного леса с наибольшим распространением сосны. Только в северо-западной части бассейна встречается темнохвойная тайга. Озер и болот в бассейне водохранилища встречается мало. Механический состав почв разнообразен. Северо-западная и центральная части бассейна представлены хрящеватыми почвами. В юго-западной части бассейна встречаются легкосуглинистые и супесчаные почвы, а в восточной части – среднесуглинистые.

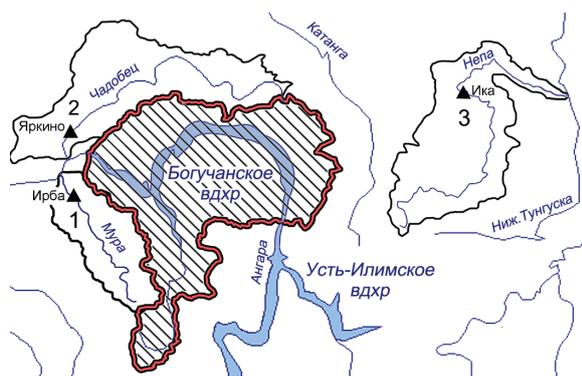
### Постановка задачи

Суммарный приток к створу Богучанской ГЭС складывается из двух составляющих:

- 1) приток с зарегулированной части бассейна (сбросы Усть-Илимской ГЭС);
- 2) боковой приток с промежуточной площади бассейна (рис. 1), между плотинами Уст-Илимской и Богучанской ГЭС (незарегулированный боковой приток).

Существуют два основных метода определения бокового притока воды в водохранилище: по сумме расходов впадающих рек (гидрометрический метод) и по уравнению водного баланса водохранилища [1–3]. Определение притока воды по уравнению водного баланса является менее предпочтительным, поскольку в вычисленную величину притока в неявном виде входят ошибки оценки всех элементов водного баланса, а также погрешности учета аккумуляции воды в водохранилище из-за деnivelляции водной поверхности. При небольшой длительности расчетного интервала (сутки) рекомендуется рассчитывать приток с помощью гидрометрического метода.

По расходам воды рек-аналогов, бассейны которых располагаются в пределах промежуточной площади водосбора, выполнен ретроспективный расчет ежедневного бокового притока в водохранилище Богучанской ГЭС за 1977–1987 гг. Однако в настоящее время наблюдения на реках-аналогах прекращены.



**Рис. 1.** Схема бассейна бокового притока Богучанского водохранилища (красная штриховка) и расположение рек-аналогов, используемых в современной модели для расчета бокового притока: 1 – р. Чадобец; 2 – р. Мура; 3 – р. Непа

**Fig. 1.** Scheme of the basin of Boguchanskoe reservoir lateral inflow (red slash hatching) and location of rivers-analogues, used in the modern model for calculating lateral inflow: 1 – Chadobets; 2 – Mura; 3 – Nepa

Современная методика расчета бокового притока в водохранилище Богучанской ГЭС обоснована в [4]. В ней используются данные наблюдений трех малых бассейнов, которые располагаются на небольшом удалении от бассейна бокового притока в Богучанское водохранилище (рис. 1) и характеризуются подобными ландшафтно-гидрологическими условиями. Это бассейны рек Чадобец – п. Яркино, Мура – п. Ирка и Непа – п. Ика. Важно, что наблюдения на этих реках производились и в предшествующие годы (1977–1987), что позволило в [4] обосновать возможность их использования для расчета бокового притока.

Рассмотренная ниже методика прогноза бокового притока в Богучанское водохранилище основана на концептуальной модели формирования

стока с сосредоточенными параметрами. На практике пока нет оснований для перехода от выпуска краткосрочных гидрологических прогнозов по концептуальным моделям к прогнозам по физико-математическим моделям с распределенными параметрами, которые в настоящее время, как правило, не обеспечены необходимой гидрометеорологической информацией [5–9]. В основе рассматриваемой ниже модели положены следующие принципы [10]:

- в бассейне бокового притока водохранилища Богучанской ГЭС, квазиоднородном по ландшафтно-гидрологическим особенностям, были выделены четыре высотные зоны с шагом по высоте 100 м;
- в высотных зонах пространственная неравномерность снегонакопления и емкостного поглощения учитывается с применением вероятностных распределений;
- русловое добегание воды рассчитывается с применением функции плотности вероятностного распределения времени добегания элементарных объемов воды и теоретических формул моментов распределения.

Модель позволяет выпускать прогноз с заблаговременностью до 4–7 суток. Для задания температуры и осадков за период заблаговременности используются данные оперативных метеорологических прогнозов систем метеорологического прогнозирования: COSMO-RU (Росгидромет), NCEP (Национальная служба погоды США), UKMO (Метеорологическая служба Великобритании).

#### Гидролого-математическая модель прогноза

Используемая концептуальная модель основана на параметрическом описании основных процессов формирования стока [10]. Структура модели в однородном ландшафтно-гидрологическом районе включает следующие блоки:

- расчет снегонакопления по районам бассейна;
- расчет снеготаяния и площади снегового покрытия;
- расчет водоотдачи бассейна от талых вод и жидких осадков с учетом поглощения и задержания воды;
- расчет динамического запаса воды на склонах и притока воды в русловую сеть;
- расчет руслового добегания притока к замыкающему створу.

Характерной особенностью горных территорий является «пестрота» в распределении ландшафтов, вызванная значительными территориальными градиентами естественной теплообеспеченности. По этой причине ландшафтно-гидрологическая основа, обеспечивающая реализацию модели формирования речного стока, не может включать такие локальные природные геосистемы, как фауна, урочище, местность. В этом случае придется выделить многие сотни мелких природных комплексов даже в небольшом бассейне, которые не-

возможно обеспечить гидрометеорологической информацией. С учетом сказанного в основу разработки концептуальных моделей прогноза речного стока целесообразно положить следующие принципы ландшафтно-гидрологического районирования бассейна [11, 12]:

1. Основным требованием при выделении гидрологических районов является пространственная коррелированность временных колебаний метеорологических характеристик в пределах выделенного района, позволяющая приближенно учесть их изменчивость с использованием данных наблюдений ограниченного числа пунктов. Желательно, чтобы в пределах района коэффициенты парной корреляции средней суточной температуры воздуха в пунктах наблюдений были бы достаточно высокими (не менее 0,70–0,80). То же самое относится и к декадным суммам паводкообразующих осадков. В этом случае один район может «накрывать» площадь до 30–50 тыс. км<sup>2</sup>, что соответствует размерам средней реки. В крупных речных бассейнах возникает необходимость выделения не одного, а нескольких районов.
2. Учет пространственного разнообразия элементов ландшафта внутри каждого района осуществляется путем его расчленения на высотные зоны. Тем самым учитывается высотная поясность ландшафтно-климатических условий. Таким образом, горная территория достаточно крупного бассейна делится на районы и высотные зоны, тогда как в бассейнах малых и средних рек выделяются только высотные зоны. При таком подходе исходной территориальной единицей осреднения гидрометеорологических характеристик в бассейнах горных рек является высотная зона.

Бассейн бокового притока Богучанского водохранилища (площадь 47000 км<sup>2</sup>) представляет плато с широкими и плоскими междуречьями, частично заболоченными. Преобладающие высоты 200–500 м. Судя по размерам водосбора и характеру ландшафта, районы в бассейне выделять целесообразно. Следовательно, исходными территориальными единицами осреднения гидрометеорологических характеристик являются высотные зоны, которых, как упомянуто выше, выделено четыре, с превышениями 100 м.

Расчет суммарной водоотдачи в период снеготаяния для  $i$ -й высотной зоны речного бассейна ( $i=1,2,3,4$ ) выполняется на основе уравнения инфильтрационно-емкостной модели Е.Г. Попова [10, 13]:

$$Y_i(t) = (1 - w_i) \left\langle H_i(t) - P_0 th \left[ \frac{H_i(t)}{P_0} \right] \right\rangle, \quad (1)$$

где  $w_i$  – доля постоянно бессточной площади для  $i$ -й высотной зоны;  $t$  – время;  $P_0$  – водоудерживающая емкость бассейна в условиях наиболее низкого предшествующего (осеннего) увлажнения;  $th$  –

функция гиперболического тангенса;  $H_i(t)$  – интегральный слой воды, поступивший на поверхность  $i$ -й высотной зоны за период от начала снеготаяния  $t_0$  до момента  $t$

$$H_i(t) = U_i + \sum_{j=t_0}^{j=t} (h_{ci} + x_i - z_i - I)_j, \quad (2)$$

где  $U_i$  – слой заполнения водоудерживающей емкости перед началом снеготаяния;  $h_{ci}$ ,  $x_i$ ,  $z_i$  – соответственно слой талой воды, слой осадков и слой испарившейся воды за текущий интервал  $j$  в пределах  $i$ -й высотной зоны;  $I$  – количество просочившейся воды через иллювиальные (или подпахотные) горизонты за пределы почвенной водоудерживающей емкости. Просачивание  $I$  приближенно принимается равным суточному боковому притоку воды в водохранилище в конце типовой кривой спада (мм/сут), характеризующему среднее пополнение подземного (базисного) стока.

Слой заполнения емкости  $U_i$  перед началом снеготаяния формируется в результате выпадения предшествующих дождей и миграции влаги в зимний период к фронту промерзания. Перед началом снеготаяния слой воды  $U_i$  находится в замерзшем состоянии. Он аппроксимируется логарифмической формулой

$$U_i = d + c \cdot \lg(m + 1) + \text{grad}U \left( \frac{\Delta Z_i}{100} \right), \quad (3)$$

где  $d$  и  $c$  – коэффициенты;  $m$  – комплексный показатель водопроницаемости почв бассейна, учитывающий осеннее увлажнение и промерзание;  $\text{grad}U$  – градиент, учитывающий высотное изменение слоя начального заполнения водоудерживающей емкости;  $\Delta Z_i = Z_i - Z_1$  – превышение  $i$ -й высотной зоны [10].

В качестве характеристики водопроницаемости почв в [4] рассмотрен ряд показателей предвесеннего состояния речного бассейна. В результате статистического анализа получено эмпирическое уравнение для комплексного показателя  $m$ :

$$m = 2,14Q - 36,0t_2 + 200,0, \quad (4)$$

где  $Q$  – средний расход воды за ноябрь в замыкающем створе бассейна р. Чалобец – с. Яркино;  $t_2$  – температура почвы на глубине 0,2 м по станции Ванавара за февраль.

Расход воды за ноябрь в формуле (4) косвенно характеризует предзимнее увлажнение бассейна. В формуле (4) февральская температура почвы на глубине 0,2 м косвенно характеризует льдистость почвы: чем ниже температура, тем интенсивнее осуществляется миграция почвенной влаги к фронту промерзания, соответственно увеличивается льдистость почвы и происходит закупорка почвенных пор льдом [9, 11].

Уравнение (1) используется для расчета водоотдачи высотной зоны  $u_i(t)$ , под которой, согласно Е.Г. Попову, понимается слой стока, образующийся на склонах за расчетную единицу времени (сутки):

$$u_i(t) = Y_i(t) - Y_i(t-1). \quad (5)$$

Склоновый приток в русловую сеть  $q_i(t)$  определяется с учетом его зависимости от динамического (гравитационного) запаса воды на склонах  $W_i$  [10]:

$$\begin{cases} W_i(t) = W_i(t-1) + u_i(t) - q_i(t), \\ q_i(t) = \alpha_i \left[ \frac{W_i(t-1) + W_i(t)}{2} \right]^n, \end{cases} \quad (6)$$

где  $n$  – параметр (показатель степени);  $\alpha_i$  – коэффициент, интегрально характеризующий гидравлические условия склонового стока.

Система уравнений (6) позволяет методом итераций вести непрерывный расчет притока воды в русловую сеть в период снеготаяния.

Важным фактором, определяющим сопротивление движению воды на склонах, является снежный покров. В начальный период снеготаяния значительная часть образовавшейся воды накапливается под снегом и не поступает в русловую сеть. По мере схода снега наблюдается «прорывной» механизм формирования притока воды в русловую сеть. Для определения  $\alpha$  в [14] предложены следующие эмпирические зависимости. В период снеготаяния

$$a_i(t) = a_0 \exp \left[ \frac{-\beta S o_i(t-1)}{W_i(t-1) + 1} \right], \quad (7)$$

где  $\alpha_0$  – максимальные значения  $\alpha$ , наблюдаемое при отсутствии снежного покрова на склонах;  $S o_i(t-1)$  – оставшийся снегозапас на склонах в предшествующие сутки (после схода снега при  $S o_i(t-1)=0$  получим  $\alpha=\alpha_0$ );  $\beta$  – коэффициент, учитывающий эффект снижения скоростей склонового стока вследствие сопротивления снежного покрова. Согласно (7), скорости склонового стока увеличиваются при снижении оставшегося на склонах снегозапаса и возрастании динамического запаса воды.

При похолоданиях, когда температура воздуха становится отрицательной и сопротивление возрастает из-за появления ледовых образований, рекомендуется следующее приближенное соотношение для  $a_i(t)$ :

$$a_i(t) = \frac{a_i(t-1)}{(1 + 0,33 |\theta^\circ|)}, \quad (8)$$

где  $|\theta^\circ|$  – абсолютное значение величины отрицательной среднесуточной температуры воздуха. Коэффициент 0,33 (в знаменателе) может быть уточнен методом оптимизации при наличии наблюдений на малых реках.

Поступление воды за расчетную единицу времени  $\Delta t$  за счет таяния почвенного льда ( $U_i$ ) также учитывается в расчетах водоотдачи высотных зон бассейна. Предполагается, что таяние почвенного льда начинается сразу же после схода снега, с появлением проталин. Расчет суточного таяния почвенного льда осуществляется по выражению, вы-

текающему из формулы Стефана: слой растаявшей воды пропорционален корню квадратному из суммы среднесуточных положительных температур воздуха за соответствующий период. Методика приближенного учета этих явлений рассмотрена в [14].

Суммарный приток в русловую сеть  $q_i(t)$  (мм/сут) рассчитывается отдельно для каждой высотной зоны. Далее определяется среднее взвешенное значение бокового притока для всего бассейна

$$q(t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) \varphi_i, \quad (9)$$

где  $\varphi_i$  – доля площади  $i$ -й высотной зоны;  $n=4$  – число высотных зон.

Прогноз расхода воды выполняется с учётом принципа суперпозиции по следующему выражению [10]:

$$Q(t + \Delta t) = \left[ \int_0^{t+\Delta t} q(t + \Delta t - \tau) f_h(\tau) d\tau \right] + Q_w(t + \Delta t) + Q_{\min}, \quad (10)$$

где  $Q(t+\Delta t)$  – расход воды в замыкающем створе;  $t$  – дата выпуска прогноза;  $\Delta t$  – заблаговременность прогноза;  $f_h(\tau)$  – бассейновая кривая добега бокового притока;  $Q_w(t+\Delta t)$  – составляющая расхода воды, обусловленная истощением начального (на момент выпуска прогноза  $t$ ) запаса воды в русловой сети бассейна;  $Q_{\min}$  – устойчивое подземное («базисное») питание реки.

В расчетное выражение (10) входят кривая добега  $f_h(\tau)$  бокового притока, характеризующая последовательность прохождения во времени через замыкающий створ объёмов воды, поступивших в русловую сеть. Для ее описания использован подход, основанный на вероятностной трактовке кривой добега [10], рассматривающий эту кривую как плотность распределения времени добега элементарных объёмов воды.

Первый член правой части формулы (10) характеризует составляющую расхода воды в момент  $(t+\Delta t)$ , обусловленную поступлением талых и дождевых вод за период заблаговременности прогноза. Для определения второго члена правой части  $Q_w(t+\Delta t)$  разобьем рассматриваемую русловую сеть на участки. В пределах каждого  $i$ -го участка располагается  $i$ -й пункт наблюдений за уровнями воды. Запас воды в русловой сети представим в виде

$$W_i(t) = \sum_{i=1}^m \omega_i(H_i(t)) L_i, \quad (11)$$

где  $\omega(H_i(t))$  – площадь поперечного сечения на  $i$ -м участке, как функция уровня воды  $H_i(t)$ ;  $L_i$  – длина участка (сумма берется по всем  $m$  участкам).

Представим площадь поперечного сечения на  $i$ -м участке в виде нелинейной функции уровня воды и введем кривую добега  $f_h(\tau)$  русловых запасов  $W_i(t)$ . Тогда выражение для прогноза притока воды получает вид [10]:

$$Q(t + \Delta t) = \left[ c_0 \int_0^{\Delta t} q(t + \Delta t - \tau) f_h(\tau) d\tau + \sum_{i=1}^m c_i (H_i(t) - H_{i \min})^{y_1} + \sum_{i=1}^m c_{i+m} (H_i(t) - H_i(t-1)) \right] + Q_{\min}. \quad (12)$$

Формула (12) учитывает как метеорологические факторы (атмосферные осадки, температуру воздуха), так и гидрологические (уровни воды в речной системе), т. е. является комбинированной моделью. Сборные коэффициенты ( $c_0, c_1, c_2, \dots$ ) в (12) определяются в процессе оптимизации параметров прогностической модели. Преимущество рассмотренного подхода состоит в том, что при наличии многолетних данных наблюдений, позволяющих выполнить оптимизацию параметров модели, отсутствует необходимость в громоздких расчетах запаса воды в речной сети. Также не требуется рассчитывать ординаты кривой добегаания русловых объемов  $W_i(t)$ : они учитываются через сборные коэффициенты  $c_i$ .

#### Результаты исследования

Как подметил Э.М. Ольдекоп [15], существует приближенное соотношение между суммами зимних осадков, выпавших за одинаковые календарные периоды на нижних и верхних высотных уровнях горного склона за конкретный год. Зная модульный коэффициент запаса воды в снеге по данным снегомерной съемки на опорной метеостанции  $m_0 = S_0 / \bar{S}_0$  (где  $S_0$  и  $\bar{S}_0$  – соответственно запас снега перед началом снеготаяния за конкретный год и его среднее многолетнее значение), можно рассчитать снеговзапас  $S(H)$  для высотной зоны  $H$ . Для этого должна быть известна средняя многолетняя величина запаса снега  $\bar{S}(H)$  для этой высотной зоны. Очевидно,

$$S(H) = m_0 \bar{S}(H). \quad (13)$$

Заметим, что  $S_0$  и  $\bar{S}_0$  на опорной станции рассчитываются с учетом снеговзапаса на этой станции и количества осадков  $\Delta X_{0H}$ , выпавших за период от даты начала снегонакопления на высоте  $H$  до той же даты на высоте опорной станции.

Для исследуемой территории распределение средних многолетних значений запаса снега по высотным зонам  $\bar{S}(H)$  получено с использованием данных снегомерных съемок Росгидромета. Карта изолиний средних многолетних запасов воды в снежном покрове в средней части бассейна Енисея и нижней Ангары представлена на рис. 2.

За конкретные годы запасы воды в снежном покрове для высотных зон рассчитываются по формуле (13). Далее, зная температуру воздуха, по методике А.Г. Ковзеля [16] рассчитываются ход суточного поступления талой воды на поверхность почвы и размеры покрытой снегом площади для

высотных зон. С другой стороны, информацию о динамике площади снегового покрытия можно получить на основе космического мониторинга [17–20]. Специальное программное обеспечение позволяет обрабатывать спутниковую информацию в автоматическом режиме. Космические изображения, которые послужили основой для определения заснеженности, были отобраны для случаев с облачностью, не превышающей 5 %.

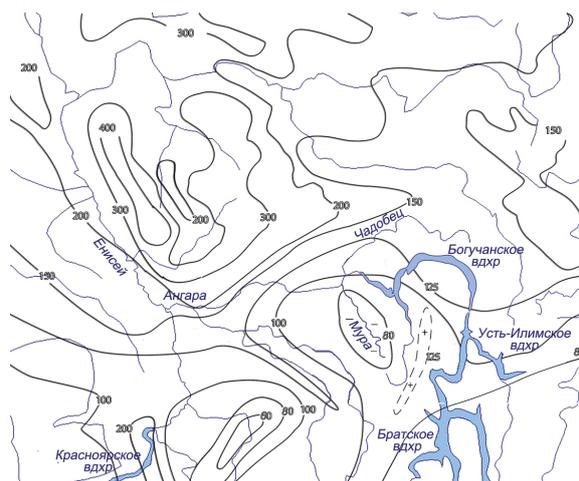


Рис. 2. Норма запасов воды в снежном покрове (мм) перед началом снеготаяния в бассейне Среднего Енисея и Ангары [4]

Fig. 2. Norm of water reserves in snow cover (mm) in the basin of the Middle Yenisei and Angara before snow melting [4]

Для бассейна бокового притока Богучанского водохранилища выполнено сопоставление временного хода заснеженности в периоды снеготаяния по высотным зонам за 2010–2015 гг., рассчитанного по модели и по спутниковым данным. Если оценки заснеженности по данным космической информации заметно отличаются от рассчитанных значений, то следует производить корректировку параметров блока модели, рассчитывающего ход заснеженности. Прежде всего речь идет об уточнении распределения средних многолетних значений запаса снега по высотным зонам  $S-(H)$ . Выполненное сравнение хода «космической» и рассчитанной («модельной») заснеженности для исследуемого бассейна показало их близкое совпадение, что подтвердило реальность полученной оценки хода снеготаяния в исследуемом бассейне. Корректировка  $S-(H)$  в этом случае не проводилась.

Оптимизация параметров модели выполнена по следующим данным наблюдений гидрометеорологической сети за период с 1978 по 2012 г.:

- ежедневные расходы (уровни) воды на 3-х гидрологических постах (р. Мура – с. Ирба, р. Чадобец – с. Яркино, р. Непа – с. Ика);
- ежедневные данные о суточных величинах осадков и температуры воздуха по 5 станциям (п. Абан, с. Богучаны, п. Чемдальск, с. Ванавара, г. Тайшет);

- данные о запасах воды в снежном покрове по 8 станциям на конец второй декады марта (с. Ванавара, п. Чемдальск, с. Богучаны, п. Мотыгино, д. Бедома, с. Ирба, п. Северо-Енисейский, п. Татарка).

В процессе оптимизации параметров модели определены значения коэффициентов ( $w_i, P_0, d, c, \text{grad}U, \alpha_0, \beta, c_0, c_1, c_2, \dots$ ) и показателей степени ( $n, y1$ ) в математических соотношениях модели (формулы 1, 3, 4, 6, 7, 8, 12). Оптимизация неизвестных параметров выполняется в двух вариантах:

- а) без учёта уровней воды по длине речной системы (модель «снеготаяние–осадки–сток»):

$$Q(t + \Delta t) = \left[ \int_0^{t+\Delta t} q(t + \Delta t - \tau) f_h(\tau) d\tau \right] + Q_{\min}; \quad (14)$$

- б) комбинированная модель, учитывающая дополнительно уровни воды по длине речной системы (формула 12).

Искомые параметры можно разделить на три группы:

- 1) параметры склонового притока воды в русловую сеть ( $w_i, P_0, d, c, \text{grad}U, \alpha_0, \beta$ );
- 2) параметры кривых руслового добегания;
- 3) параметры, отражающие влияние начальных (на дату выпуска прогноза) запасов воды в русловой сети ( $c_0, c_1, c_2, \dots, c_{n+1}, c_{n+2}, c_{n+3}, \dots, y1$ ).

Первые две группы параметров оптимизируются для варианта «а» (14), параметры третьей группы определяются для варианта «б» (комбинированная модель, формула 12). Все параметры, полученные в процессе оптимизации варианта модели «а», в дальнейшем без изменений используются в комбинированной модели «б».

В бассейне бокового притока Богучанского водохранилища преобладают светлохвойные леса с наибольшим распространением сосны. Наличие легких супесчаных и водопроницаемых хрящеватых почв объясняет значительную долю площади, на которой отсутствует поверхностный сток ( $w_i$ ). Особенно велика она для нижней высотной зоны бассейна. По результатам оптимизации ее доля для всего бассейна составляет 0,38 (или 38 %).

На рис. 3 представлена зависимость слоя заполнения емкости  $U_i$  рассматриваемого бассейна перед началом снеготаяния от комплексного показателя водопроницаемости почв бассейна ( $m$ ). Она рассчитана по формуле (3) после подстановки значений оптимальных параметров для четырех высотных зон бассейна.

Напомним, что превышение высотных зон составляет 100 м. Увеличение слоя  $U_i$  между первой и четвертой зоной ( $\Delta U = U_4 - U_1$ ) при заданном значении  $m$  составляет примерно 7 мм. При изменении косвенного показателя водопроницаемости почв ( $m$ ) в пределах от 0 до 35 слой заполнения емкости  $U_i$  увеличивается на 18 мм (рис. 3). Расчеты показывают, что соответствующие изменения притока в русловую сеть, выраженного в мм слоя, имеют тот же порядок.

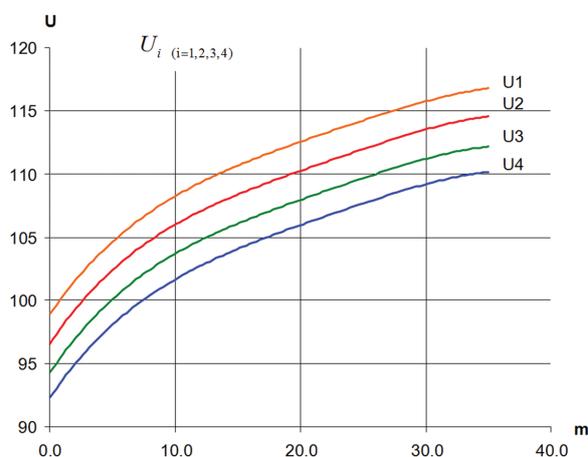


Рис. 3. Зависимость  $U_i(m)$ , рассчитанная по формуле (3) для высотных зон бассейна

Fig. 3. Dependence  $U_i(m)$  calculated by the formula (3) for high rise areas of the basin

Напомним, что в практике гидрологических прогнозов за критерий качества принимается отношение средней квадратичной ошибки прогноза  $\sigma_n$  к среднему квадратичному отклонению расхода воды за период заблаговременности прогноза  $\sigma$ . На основе расчетов, выполненных по материалам независимых наблюдений, получены критерии качества прогноза ( $\sigma_n/\sigma$ ) от 0,312 до 0,575, при заблаговременности прогноза от 1 до 7 суток (см. табл.), что указывает на «хорошую» оценку качества.

Таблица. Показатели точности модели прогноза бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС

Table. Indicators of accuracy in forecasting lateral inflow models in Boguchanskaya HPP reservoir

Заблаговременность прогноза, сутки Earliness of forecast, day	Средняя квадратичная ошибка прогноза $\sigma_n$ , м <sup>3</sup> /с Mean-square prediction error $\sigma_n$ , m <sup>3</sup> /s	Среднее квадратичное отклонение расхода воды за период заблаговременности прогноза $\sigma$ , м <sup>3</sup> /с Mean-square deviation of water flow over the advance time period of the forecast $\sigma$ , m <sup>3</sup> /s	Критерий качества $\sigma_n/\sigma$ Forecast performance criterion $\sigma_n/\sigma$
1	54,6	94,9	0,575
2	90,5	182	0,497
3	114	260	0,438
4	129	331	0,391
5	139	395	0,352
6	146	453	0,322
7	158	507	0,312

Полученные оценки качества модели позволяют рекомендовать её для оперативных краткосрочных прогнозов бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС. На рис. 4 представлены гидрографы притока воды в Богучанское водохранилище за 2014 и 2015 гг., рассчитанные гидрометрическим методом и по прогностической модели.

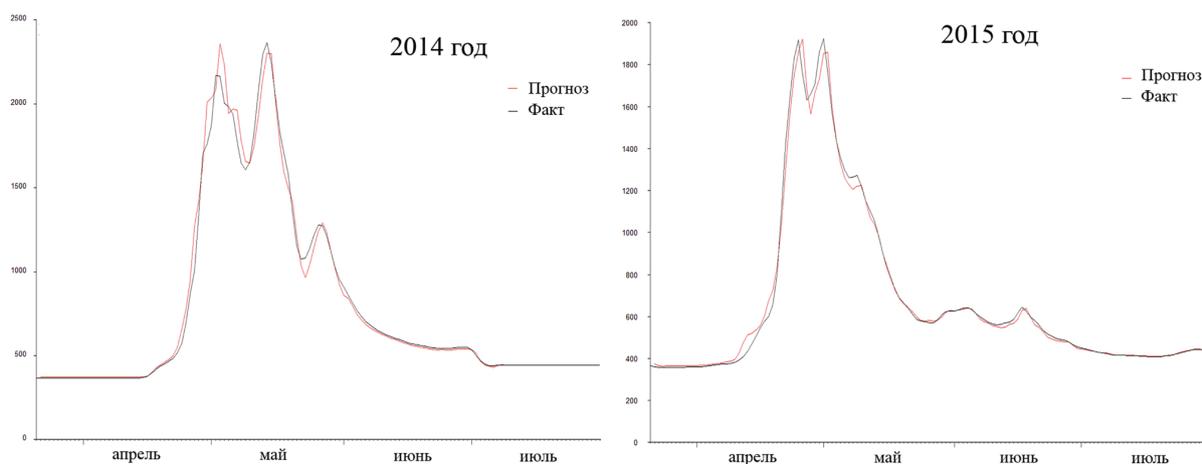


Рис. 4. Фактические и рассчитанные по математической модели (заблаговременность – 2 дня) гидрографы притока воды за 2014 и 2015 гг.

Fig. 4. Real and calculated by a mathematical model (earliness is 2 days) hydrographs of water inflow for 2014 and 2015

### Заключение

Прогноз весеннего стока сводится к определению запасов воды в снежном покрове, расчету интенсивности снеготаяния, оценке поглощения воды на склонах бассейна. Основным фактором потери весеннего стока в рассматриваемых условиях является осеннее увлажнение водосборов. Исследования показали, что на потери весеннего стока влияют условия промерзания почвы. Чем ниже зимняя температура воздуха и больше степень предзимнего увлажнения почв бассейна, тем большее количество влаги подтягивается к фронту промерзания. Этим, на наш взгляд, объясняются положительные результаты применения комплексного показателя ( $m$ ) для характеристики начального состояния бассейна.

Концептуальная модель прогноза суточного притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС включает следующие блоки: снегонакопление, снеготаяние, поглощение воды на склонах, склоновый приток в русловую сеть, русловое доб-

егание воды. Реализована модель, в которой используется не только наземная, но и спутниковая информация о динамике площади снегового покрытия бассейна в период снеготаяния. Точность кратко- и среднесрочных прогнозов по рассматриваемой модели существенно повышается благодаря учету запасов воды в русловой сети на дату выпуска прогноза по уровням воды, измеряемым в пунктах наблюдений в речной системе. Реализация модели дает возможность точнее исследовать режим речного стока. Появляется возможность получения количественных характеристик снегонакопления, снеготаяния и водоотдачи бассейна по высотным зонам в условиях ограниченной гидрометеорологической информации, а также в условиях, когда лишь немногие параметры гидрометеорологических процессов могут быть реально измерены.

Проведенные испытания метода прогноза на независимом материале наблюдений за 2014 и 2015 гг. показали его эффективность.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нежиховский Р.А. Гидрологические расчеты и прогнозы при эксплуатации водохранилищ и озер. – Л.: Гидрометеоздат, 1961. – 295 с.
2. Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2007. – 436 с.
3. Савичев О.Г., Краснощечков С.Ю., Наливайко Н.Г. Регулирование речного стока. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 114 с.
4. Путинцев Л.А. Методика долгосрочного прогноза бокового притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС на р. Ангаре // Вестник ТГУ. – 2015. – № 398. – С. 243–250.
5. Vijay P. Singh. Computer Models of Watershed Hydrology. – Littleton: Water Resources Publ., 2012. – 1144 p.
6. The distributed model intercomparison project – Phase 2: motivation and design of the Oklahoma experiments / M.B. Smith, V. Koren, S. Reed, Z. Zhang, Yu. Zhang, F. Moreda, Z. Cui, N. Mizukami, E.A. Anderson, B.A. Cosgrove // J. Hydrol. – 2012. – P. 3–16, 418–419.
7. The distributed model intercomparison project. Phase 2: Experiment design and summary results of the western basin experiments / M. Smith, V. Koren, Z. Zhang, F. Moreda, Z. Cui, B. Cosgrove, N. Mizukami, D. Kitzmiller, F. Ding, S. Reed, E. Anderson, J. Schaake, Y. Zhang, V. Andréassiane, C. Perrine, L. Coron, A. Valéry, B. Khakbaz, S. Sorooshian, A. Behrangi, B. Imam, K.L. Hsu, E. Todini, G. Coccia, C. Mazzetti, E.O. Andres, F. Francés, I. Orozco, R. Hartman, A. Henkel, P. Fickenschner, S. Staggs // Journal of Hydrology. – 2013. – № 507. – P. 300–329.
8. Karamouz E. Adams, Pagano Th.C. Flood Forecasting: a Global Perspective. – San Diego: Academic Press, 2016. – 478 p.
9. Karamouz M., Nazif S., Falahi M. Hydrology and Hydroclimatology. Principles and Applications. – Boca Raton: CRC Press (Taylor & Francis Group), 2013. – 716 p.

10. Бураков Д.А., Каропова Е.Д., Шайдуров В.В. Математическое моделирование стока: теоретические основы, современное состояние, перспективы // Вестник Красноярского государственного университета (физико-математические науки). – 2006. – Вып. 4. – С. 3–19
11. Бураков Д.А., Горошко Н.В. Ландшафтно-гидрологическое районирование в моделях прогноза речного стока (на примере бассейна Верхней Оби) // Географическая наука, туризм и образование: современные проблемы и перспективы развития: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. – Новосибирск: НГПУ, 2015. – С. 14–17.
12. Semenova O., Beven K. Barriers to progress in distributed hydrological modeling // Hydrological Processes. – 2015. – № 29. – P. 2074–2078.
13. Попов Е.Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1963. – 395 с.
14. Бураков Д.А., Адамович А.А. Учет весенних заморозков в математической модели прогноза наводнений в бассейне Енисея // Труды VII научной конференции «Современные методы математического моделирования». Т. 1. – Красноярск: ИВМ СО РАН, 2003. – С. 14–21.
15. Ольдекоп Э. М. Зависимость режима р. Чирчик от метеорологических факторов // Материалы по вопросу зависимости режима Туркестанских рек от метеорологических факторов. – Чирчикский отдел земельных улучшений в Туркестане. – 1918. – Вып. 1. – С. 15–27.
16. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 419 с.
17. Riggs G.A., Hall D.K., Salomonson V.V. MODIS Snow Products. User guide to Collection 5. November 2006. 80 p. URL: [http://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/uploads/sug\\_c5.pdf](http://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/uploads/sug_c5.pdf) (дата обращения: 05.04.2016 г.).
18. Yong-Keun Lee, Cezar Kongoli, Jeffrey Key. An In-Depth Evaluation of Heritage Algorithms for Snow Cover and Snow Depth Using AMSR-E and AMSR2 Measurements // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – April 2016. – V. 33. – № 4. – P. 2319–2336.
19. Zotov L., Shum C., Frolova N. Gravity changes over Russian rivers basins from GRACE // Planetary Exploration and Science: Recent Results and Advances. – Heidelberg: Springer Geophysics, 2015. – P. 45–59.
20. Seasonal variability of the Western Siberia wetlands from satellite radar altimetry / E.A. Zakharova, A.V. Kouraev, F. Rémy, V.A. Zemtsov, S.N. Kirpotin // Journal of Hydrology. – 2014. – № 512. – P. 366–378. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.002>.

*Поступила 09.04.2016 г.*

#### **Информация об авторах**

**Бураков Д.А.**, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой природообустройства Института землеустройства, кадастров и природообустройства Красноярского государственного аграрного университета.

**Путинцев Л.А.**, ведущий гидролог отдела гидрологических прогнозов ФГБУ «Среднесибирское УГМС».

UDC 556.06; 556.166; 556; 512

## SHORT-TERM FORECAST OF LATERAL INFLOW IN BOGUCHANSKAYA HYDROPOWER STATION RESERVOIR

Dmitry A. Burakov<sup>1</sup>,  
daburakov@yandex.ru

Lev A. Putintsev<sup>2</sup>,  
leo77789@mail.ru

<sup>1</sup> Krasnoyarsk State Agrarian University,  
90, Mira street, Krasnoyarsk, 660049, Russia.

<sup>2</sup> Federal State Budget Institution «Srednesibirskoye UGMS»,  
28, Surikov street, Krasnoyarsk, 660049, Russia.

**Relevance of the work.** Boguchanskaya hydropower station on the Angara river was put into operation in 2014. It is one of the largest hydraulic engineering constructions in Eastern Siberia. Boguchanskaya hydropower station is designed to meet the growing energy deficit. At project operating mode of the hydropower station, the level of the reservoir should be changed within  $\pm 0,5$  m. The reliable short-term forecasts of lateral inflow are required at such slight alteration of the level for preventing the situations related to overflow of Boguchanskaya hydropower station reservoir. The existing method of calculation and forecast of the lateral inflow is out of date. This fact defines the relevance of the research.

**The main aim** of the study is to implement the mathematical model of river flow formation under landscape-hydrological conditions of Boguchanskaya hydropower station reservoir basin for short-term (1–7 days) forecasts of lateral inflow.

**The methods used in the study:** water balance method, geographical and hydrological method, mathematical modeling of flow formation.

**The results.** The mathematical model of the water flow formation was adapted based on convolution integral for short-term forecasting of the inflow into Boguchanskoe reservoir at the Angara river (the Russian Federation). The paper introduces the landscape-hydrological base that ensures the model implementation. The authors have estimated snow accumulation on the territory of the lateral inflow basin in Boguchanskoe reservoir, using a land-based snow-shooting of Rosgidromet and satellite information on the dynamics of snow cover. A complex index of soil water permeability of the basin was substantiated. The index takes into account autumn moistening and soil freezing. The authors developed the technique of the short-term forecast of the lateral inflow into the Boguchanskaya hydropower station reservoir.

### Key words:

Spring flood, conceptual model of flow formation, hydrological forecasts, Boguchanskaya HPP, lateral inflow.

### REFERENCES

1. Nezhilovskiy R.A. *Gidrologicheskiye raschety i prognozy pri ekspluatatsii vodokhranilishch i ozer* [Hydrological calculations and forecasts in use of reservoirs and lakes]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1961. 295 p.
2. Georgiyevskiy Yu.M., Shanochkin S.V. *Gidrologicheskiye prognozy* [Hydrological forecasts]. St.-Petersburg, RGGMU Publ., 2007. 436 p.
3. Savichev O.G., Krasnoshchekov S.Yu., Nalivayko N.G. *Regulirovaniye rechnogo stoka* [Regulation of river flow]. Tomsk, TPU Publ. house, 2009. 114 p.
4. Putintsev L.A. Method of long-term forecasting of lateral inflow into Boguchanskaya HPP reservoir on the Angara river. *Vestnik of Tomsk State University*, 2015, no. 398, pp. 243–250. In Rus.
5. Vijay P. Singh. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Littleton, Water Resources Publ., 2012. 1144 p.
6. Smith M., Koren V., Zhang Z., Zhang Y., Reed S., Cui Z., Moreda F., Anderson E., Cosgrove B., Mizukami N. DMIP 2 Participants, Overall results of the DMIP 2 Oklahoma experiments. *J. Hydrol.* 2012, pp. 3–16, 418–419.
7. Smith M., Koren V., Zhang Z., Moreda F., Cui Z., Cosgrove B., Mizukami N., Kitzmiller D., Ding F., Reed S., Anderson E., Schake J., Zhang Y., Andréassiane V., Perrine C., Coron L., Valéry A., Khakbaz B., Sorooshian S., Behrangi A., Imam B., Hsu K.-L., Todini E., Coccia G., Mazzetti C., Andres E.O., Francés F., Orozco I., Hartman R., Henkel A., Fickensch P., Staggs S. The distributed model intercomparison project. Phase 2: Experiment design and summary results of the western basin experiments. *Journal of Hydrology*, 2013, no. 507, pp. 300–329.
8. Karamouz E. Adams, Th.C. Pagano. *Flood Forecasting: a Global Perspective*. San Diego, Academic Press, 2016. 478 p.
9. Karamouz M., Nazif S., Falahi M. *Hydrology and Hydroclimatology. Principles and Applications*. Boca Raton, CRC Press (Taylor & Francis Group), 2013. 716 p.
10. Burakov D.A., Karepova E.D., Shaydurov V.V. Mathematical modeling of water flow: theoretical foundations, current status and prospects. *Bulletin of Krasnoyarsk State University (Physics and mathematics)*, 2006, vol. 4, pp. 3–19.
11. Burakov D.A., Goroshko N.V. Landshaftno-gidrologicheskoye rayonirovaniye v modelyakh prognoza rechnogo stoka (na primere basseyna Verkhney Obi) [Landscape-hydrological regionalization in models of forecasting river flow (by the example of the Upper Ob Basin)]. *Materialy IV Vserossiyskoy konferentsii* [Materials of the IV All-Russian conference]. Novosibirsk, NSPU, 2015. pp. 14–17.
12. Semenova O., Beven K. Barriers to progress in distributed hydrological modeling. *Hydrological Processes*, 2015, vol. 29, pp. 2074–2078.
13. Popov E.G. *Voprosy teorii i praktiki prognozov rechnogo stoka* [Theory and practice of river flow forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1963. 395p.

14. Burakov D.A., Adamovich A.A. Uchet vesennikh zamorozkov v matematicheskoy modeli prognoza navodneniy v bassejne Yeniseya [Consideration of spring frosts in the mathematical model of flood prediction in the Yenisei basin]. *Trudy VII nauchnoy konferentsii «Sovremennye metody matematicheskogo modelirovaniya»* [Modern methods of mathematical modeling. Proc. VII scientific conference]. Krasnoyarsk, IVM SO RAN, 2003. Vol. 1, pp. 14–21.
15. Oldekop E.M. Zavisimost rezhima r. Chirchik ot meteorologicheskikh faktorov [Dependence of the Chirchik river mode on meteorological factors]. *Materialy po voprosu zavisimosti rezhima Turkestanskikh rek ot meteorologicheskikh faktorov* [Materials on the issue of Turkestan river mode dependence on meteorological factors]. Tashkent, 1918. Vol. 1, pp. 15–27.
16. Apollov B.A., Kalinin G.P., Komarov V.D. *Kurs gidrologicheskikh prognozov* [Course of hydrological forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 419 p.
17. Riggs G.A., Hall D.K., Salomonson V.V. *MODIS Snow Products. User guide to Collection 5*. November 2006. 80 p. Available at: [http://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/uploads/sug\\_c5.pdf](http://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/uploads/sug_c5.pdf) (accessed 05.04.2016).
18. Yong-Keun Lee, Cezar Kongoli, Jeffrey Key «An In-Depth Evaluation of Heritage Algorithms for Snow Cover and Snow Depth Using AMSR-E and AMSR2 Measurements». *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, April 2016, vol. 33, no. 4, pp. 2319–2336.
19. Zotov L., Shum C., Frolova N. Gravity changes over Russian rivers basins from GRACE. *Planetary Exploration and Science: Recent Results and Advances*. Heidelberg, Springer Geophysics, 2015. pp. 45–59.
20. Zakharova E.A., Kouraev A.V., Rémy F., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N. Seasonal variability of the Western Siberia wetlands from satellite radar altimetry. *Journal of Hydrology*, 2014, no. 512, pp. 366–378.

Received: 9 April 2016.

#### Information about the authors

**Dmitry A. Burakov**, Dr. Sc., professor, Krasnoyarsk State Agrarian University.

**Lev A. Putintsev**, lead hydrologist, Federal State Budget Institution «Srednesibirskoye UGMS».