

МЕТОДИКА ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА БОКОВОГО ПРИТОКА ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ БОГУЧАНСКОЙ ГЭС НА р. АНГАРЕ

По данным о стоке рек-аналогов получен боковой приток в Богучанское водохранилище за второй квартал, прогноз которого имеет большое значение для планирования работы ГЭС. Метод прогноза бокового притока основывается на результатах оценки составляющих водного баланса в рассматриваемом бассейне. Теоретической основой метода является инфильтрационно-емкостная модель поглощения воды бассейном. В качестве косвенных показателей водопроницаемости почвы перед началом снеготаяния используются различные характеристики предвесеннего состояния почвогрунтов.

Ключевые слова: весеннее половодье; испарение; инфильтрация; водоудерживающая емкость; емкостное поглощение; гидрограф стока.

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

Цель статьи – исследовать факторы, влияющие на сток весеннего половодья, и разработать методику его долгосрочного прогноза.

В основу настоящей статьи положены данные гидрометеорологических наблюдений сети станций и постов Среднесибирского и Иркутского управлений по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС), фондовые материалы, публикации, крупномасштабные топографические карты.

Боковой приток в рассматриваемое водохранилище формируется с площади 47 000 км² на участке между плотинами Усть-Илимской и Богучанской ГЭС. Отметка нормального подпорного уровня водохранилища составляет 208,0. Расчетный напор при нормальном подпорном уровне (НПУ) – 65,5 м, площадь зеркала при НПУ – 2326 тыс. км². Водохранилище будет осуществлять суточное и сезонное регулирование стока Ангары, 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 в зоне средней и южной тайги Приангарской провинции [1. С. 174]. Диапазон высот в бассейне бокового притока водохранилища от 208 до 650 м, преобладают высоты от 208 до 400 м. Возвышенная часть бассейна располагается на востоке, между реками 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 и безветренной погодой. Лето в среднем теплое, короткое. Климат резко континентальный. Следуя орографии местности, годовое количество осадков в преде-

лах 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. В среднем по территории бассейна выпадает около 400 мм осадков в год. В северо-восточной части района на наветренных склонах Заангарского плато (верхнее течение р. Чадобец) выпадает наибольшее количество осадков (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 левобережье бассейна Ангары не превышает 50 см, в пределах правобережья она достигает 75–80 см.

Основной почвенный фон составляют почвы дерново-подзолистого и подзолистого типов, лишь на востоке бассейн р. Ката представлен дерново-лесными почвами. Механический состав указанных почв разнообразен. Северо-западная и центральная части бассейна представлены хрящеватыми почвами. В юго-западной части встречаются легкосуглинистые и супесчаные почвы, а в восточной части – среднесуглинистые.

Исследуемая территория находится в зоне южной и средней тайги с преобладанием светлохвойного леса с наибольшим распространением сосны. Только на северо-западной части бассейна встречается темнохвойная тайга, представленная еловыми, кедровыми и пихтовыми лесами.

Озер и болот в бассейне водохранилища встречается мало, их регулирующее влияние на сток рек не существенно. Заболачиванию подвержены увлажненные северные склоны долин и междуречий. В бассейне Богучанского водохранилища самыми значительными реками являются Кова, Тушама, Ката и Едарма.

За последние 20 лет большинство гидрометеорологических пунктов наблюдений на нижней Ангаре закрыты. Методика расчета и прогноза притока воды в Богучанское водохранилище, разработанная в отделе гидрологических прогнозов Среднесибирского УГМС в 1980-х гг., требует коренной переработки.

В настоящее время наблюдения за расходами воды проводятся на двух малых реках, расположенных ни-

же по течению от плотины Богучанской ГЭС: р. Чадобец – п. Яркино и р. Мура – п. Ирба. Рассмотрим ландшафтно-гидрологические характеристики этих бассейнов.

Река Мура, левый (южный) 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 (ниже плотины Богучанской ГЭС) – 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-подзолистые. Механический состав разнообразен. В верхнем и среднем течении, до впадения р. Чудоба (правый приток р. Мура), распространены песчаные и легкосуглинистые почвы, ниже по течению они сменяются хрящеватыми. Растительность представлена преимущественно сосновыми средне- и южно-таежными лесами. Безлесные участки составляют 15%, они встречаются в районе с. Ирба и у устья р. Чудоба.

Река Чадобец, правый (северный) приток р. Ангары, площадь бассейна 13 700 км². 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-подзолистые, 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.

Река Чадобец характеризует правобережную территорию Богучанского водохранилища, р. Мура – левобережную. Бассейны этих рек-аналогов располагаются на небольшом удалении от бассейна бокового притока в Богучанское водохранилище и характеризуются подобными ландшафтно-гидрологическими условиями, что послужило основанием рассматривать их в качестве бассейнов-аналогов. Они использовались для расчета ежедневного бокового притока воды в Богучанское водохранилище [2]. Установлена его связь со стоком талых вод рек Чадобец и Мура. Уравнение этой связи имеет вид

$$Q_{2кв} = 2,7 \times Y_{чад} + 0,896 \times Y_{мура} + 538, \quad (1)$$

где $Q_{2кв}$ – боковой приток (м³/с) в Богучанское водохранилище за 2-й квартал (апрель–июнь); $Y_{чад}$, $Y_{мура}$ – сток талых вод (мм) бассейнов-аналогов р. Чадобец – с. Яркино и р. Мура – с. Ирба соответственно.

Коэффициент множественной корреляции (R) зависимости (1) равен 0,891. Следовательно, для долгосрочного прогноза притока воды в Богучанское водохранилище за второй квартал необходимо разработать методику прогноза весеннего стока перечисленных рек-аналогов.

Водный режим этих рек характеризуется ярко выраженным весенним половодьем. Наибольшее значение при формировании половодья имеют запасы воды в снеге перед началом таяния (S). Снегомерные съемки гидрометеорологической службы освещают снегонакопление в долинах рек, где расположены населенные пункты. Трудность изучения снегонакопления в горно-таежных районах связана с отсутствием пунктов снегомерных съемок на возвышенных плато и горных склонах, где, как правило, запасы воды в снежном покрове могут заметно возрастать.

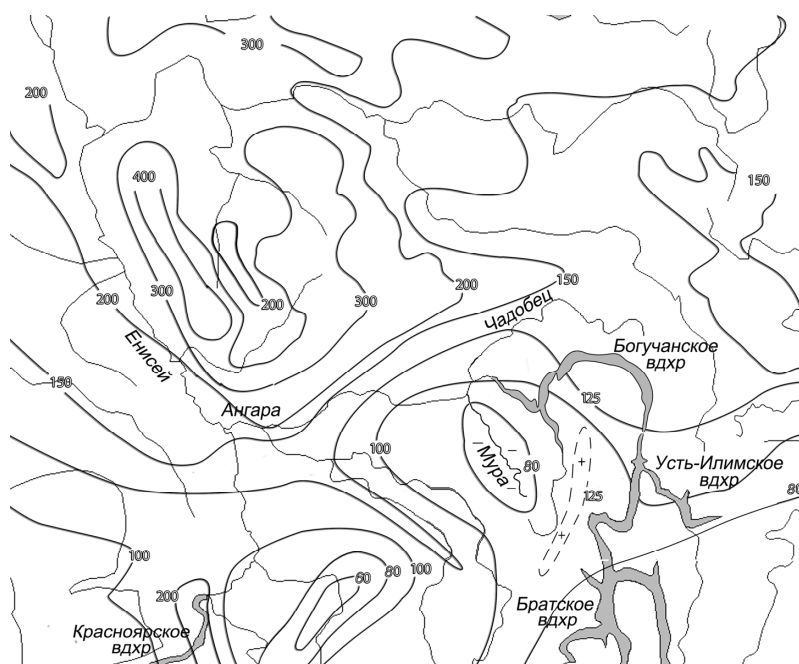


Рис. 1. Средние многолетние запасы воды в снежном покрове перед началом снеготаяния, мм

На рис. 1 представлена карта изолиний средних многолетних запасов воды в снежном покрове в бассейне среднего Енисея, в основу которой положены данные снегомерных съемок Среднесибирского и Иркутского УГМС и результаты исследований А.В. Петенкова [3. С. 100].

Для определения средних запасов воды в снеге (S) и осадков за период снеготаяния (x) в бассейнах-аналогах Чадобец и Мура использована метеорологическая информация по ряду метеорологических станций, которые располагаются в непосредственной близости от рассматриваемых бассейнов-аналогов:

– в бассейне р. Чадобец: Усть-Камо, Байкит, Тартарка, Северо-Енисейский;

– в бассейне р. Мура: Мотыгино, Стрелка, Абан, Богучаны.

Средний для бассейнов рек запас воды в снеге был рассчитан как средний взвешенный в пунктах наблюдений, весовые коэффициенты найдены на основе регрессионного анализа (в уравнении регрессии предиктантом был весенний сток рассматриваемых рек-аналогов Чадобец и Мура, предикторами – снегозапас по данным станций, указанных выше, и показатель увлажнения бассейнов). Осадки за период снеготаяния (x) получены как среднее арифметическое по данным указанных выше пунктов наблюдений.

Сток талых вод Y (табл. 1) является основной составляющей суммарного стока весеннего половодья рассматриваемых рек (41,9 мм – р. Мура, 83,0 мм – р. Чадобец). Он формируется за счет таяния накоп-

ленных за зиму запасов снега (S) и выпадающих в период снеготаяния осадков (x).

Сумма ($S + x$) представляет суммарный слой воды (154 мм – р. Мура, 248 мм – р. Чадобец), формирующий сток талых вод. В этой сумме запасы снега в 2,7–3,7 раза больше количества осадков, выпадающих в период снеготаяния (табл. 1).

Дождевой сток Y_0 в период спада половодья определяется путем расчленения гидрографа с использованием типовой кривой спада [4. С. 74–75]. Он составляет 14 мм (р. Мура) и 23 мм (р. Чадобец), т.е. 30–36% от величины стока талых вод.

Сток Y_n , обусловленный устойчивым подземным питанием, определяемый по величине предвесеннего расхода воды, на рассматриваемых реках почти на порядок меньше стока талых вод.

Таким образом, средние за многолетний период характеристики водного баланса весеннего половодья (снегонакопление, осадки и сток) в бассейне Мура примерно в 1,5 раза меньше, чем в бассейне р. Чадобец, что согласуется с территориальным распределением естественного увлажнения в рассматриваемом районе.

Коэффициент $\alpha_p = \frac{P}{S+x}$ (табл. 1), характеризующий относительные потери талого стока ($P = (S+x) - y$), в более увлажненном бассейне р. Чадобец составляет 0,66, тогда как в более засушливом бассейне р. Мура он увеличивается до 0,73.

Средние за период наблюдений характеристики стока весеннего половодья, поступления воды в период снеготаяния и потерь стока талых вод

Таблица 1

Даты		Характеристики водного баланса,								
начала половодья	конца полово- дья	мм								
		S	x	S+x	Сток весеннего половодья				Потери талого стока (P = (S+x) – y)	Коэффициент по- терь талого стока $\alpha_p = \frac{P}{S+x}$
					Y	Y ₀	Y _n	Y ₀		
		р. Мура – Ирба, F = 9 320 км ² , лесистость 85%								
2.04	7.06	112	41,8	154	41,9	14	9	64	112	0,73
		р. Чадобец – Яркино, F = 13 300 км ² , лесистость 95%								
2.05	13.06	195	53,1	248	83	23	13	119	165	0,66

Примечание. S – запас воды в снежном покрове; x – осадки за период снеготаяния; ($S+x$) – поступление воды за период снеготаяния; Y – сток талых вод; Y_0 – дождевой сток на спаде половодья; Y_n – подземный сток Y_0 – суммарный сток за период половодья; P – потери стока талых вод ($P = (S+x) - Y$).

В пределах рассматриваемой территории, где информация о глубине промерзания, температуре и влажности почвы ограничена и не всегда достаточно надежна, важное место в практике прогнозов отводится косвенным характеристикам водопоглотительной способности бассейнов. Пригодность любой характеристики (предиктора) зависит не от его частного соответствия измерениям в данной точке, а прежде всего от того, как хорошо он отражает общие условия на водосборе. Предикторы, по существу, выступают в качестве индексов, которые, изменяясь подобно истинному значению рассматриваемой величины, способны отразить ее воздействие на исследуемый процесс [5. Р. 105].

В качестве предикторов, характеризующих потери талого стока, ниже рассмотрен ряд характеристик предвесеннего состояния речного бассейна. Подбор информативных предикторов выполнен следующими способами:

1-й способ – на основе парной корреляции стока талых вод (Y) с различными характеристиками увлажнения и промерзания (m);

2-й способ – путем расчета коэффициентов множественной корреляции линейной зависимости

$$Y = a_1 (S+x) + a_2 m + b, \quad (2)$$

где a_1 , a_2 – коэффициенты регрессии; b – свободный член;

3-й способ – методом оптимизации параметров нелинейных водно-балансовых уравнений для прогноза стока талых вод, вытекающих из инфильтрационно-емкостной модели поглощения воды бассейном [4. С. 4–10; 6. С. 11–112].

Первоначально выполнена оценка парной корреляции стока талых вод (Y) с несколькими десятками различных показателей предшествующего увлажнения и промерзания бассейнов, измеряемых в пунктах гидрометеорологических наблюдений Росгидромета, в том числе: сумма среднемесячных расходов воды (Q_n) за осенний период (сентябрь–ноябрь); сумма осадков за осенний период (X_n); температура почвы на глубинах от 0,2 м и ниже за октябрь–апрель (t_n); разница температур почвы на различных глубинах; температура воздуха за те же месяцы; разница температуры почвы и температуры воздуха; фактическая глубина промерзания почвы на 10-е число каждого месяца с октября по май; сумма среднемесячных значений температуры воздуха за холодный период и др.

Первый способ позволил отобрать следующие показатели:

– среднемесячный расход воды за ноябрь (Q_{11}) по гидропроводности (г.п.) р. Чадобец – с. Яркино и р. Мура – с. Ирба;

– температура почвы на глубине 0,2 м по ст. Ванава: для бассейна р. Чадобец за январь (t_{n1}); для бассейна р. Мура за ноябрь (t_{n11});

– сумма осадков за октябрь (X_{10}) ст. Бедоба.

В табл. 2 представлены коэффициенты парной корреляции между стоком талых вод (Y) и упомяну-

тыми выше аргументами (предикторами), полученные первым способом.

Таблица 2
Коэффициенты парной корреляции стока талых вод с факторами его формирования

Речной бассейн	$r_{Y,S+x}$	$r_{Y,Q_{11}}$	$r_{Y,X_{10}}$	$r_{Y,t_{11}}$
р. Мура – Ирба	0,776	0,516	0,607	–0,395
р. Чадобец – Яркино	0,825	0,605	0,479	–0,456

Сток талых вод (Y) имеет наиболее тесную корреляционную связь с поступлением воды ($S+x$). Для рек Чадобец – с. Яркино и Мура – с. Ирба теснота связи между Y и ($S+x$) характеризуется коэффициентами парной корреляции соответственно 0,825 и 0,776. Тесные связи стока талых вод получены также с предикторами Q_{11} , X_{10} , t_{n11} , t_{n1} и их линейными комбинациями, отражающими влияние осенне-зимнего состояния бассейнов на формирование потерь стока талых вод.

Второй способ оценки репрезентативности факторов-предсказателей стока талых вод, в основу которого положен множественный регрессионный анализ, позволил получить результаты, представленные в табл. 3. Наиболее высокие коэффициенты множественной корреляции R для уравнения (2) получены с участием следующих предикторов: $S+x$ – общее поступление воды в период снеготаяния; m – комплексный показатель, учитывающий предвесеннее увлажнение и промерзание бассейнов (обозначения см. в табл. 3).

Таблица 3
Коэффициент множественной корреляции (R) зависимостей стока талых вод от поступления воды ($S+X$) и показателей осеннего увлажнения m_1 и m_2 . T -статистики и доли детерминированного вклада предикторов

Речной бассейн	Вид зависимостей	R	σ/σ_0	t -статистики при переменных правой части уравнения	Доли детерминированного вклада предикторов	
					Δ_{S+x}	Δm
р. Мура	$Y = a_1(S+x) + a_2 m_1 - b$ $m_1 = 0,303X_{10} - 2,42t_{n11}$	0,853	0,552	4,97; 3,51	0,61	0,39
	$Y = a_1(S+x) + a_2 m_2 - b$ $m_2 = 1,74Q_{11} - 2,61t_{n11}$	0,881	0,449	8,81; 4,59	0,80	0,20
р. Чадобец	$Y = a_1(S+x) + a_2 m_1 - b$ $m_1 = 0,599X_{10} - 1,98t_{n2}$	0,877	0,507	8,72; 3,24	0,86	0,14
	$Y = a_1(S+x) + a_2 m_2 - b$ $m_2 = 0,937Q_{11} - 3,57t_{n1}$	0,883	0,495	9,70; 3,50	0,95	0,05

Примечание. Коэффициенты регрессии в формулах m_1 и m_2 получены на основе статистического анализа; σ/σ_0 – критерий качества методики расчета (прогноза), где σ – средняя квадратичная ошибка, σ_0 – среднеквадратичное отклонение прогнозируемой величины (сток талых вод – Y).

Рассмотрим t -статистики для переменных правой части уравнения. Напомним, что $t_i = \frac{a_i}{\sigma_i}$, где a_i – коэффициент регрессии при i -й переменной; σ_i – средняя квадратичная ошибка оценки коэффициента регрессии. Чем больше значение t -статистики, тем переменная репрезентативнее: использование переменной со статистической точки зрения целесообразно, если t_i больше 1,5–2,0. Значения t -статистик и коэффициентов множествен-

ной корреляции R с применением различных комплексных показателей водопроницаемости почвы m_1 и m_2 показывают, что использование предзимнего расхода воды (Q_{11}) обеспечивает несколько большую показательность комплексной характеристики водопроницаемости почвы, чем предзимних осадков (X_{10}).

Как показано в [7], использование t_{n11} и t_{n1} в качестве характеристики водопроницаемости почвы связано с ее влиянием на льдистость почвы: чем ниже температура почвы в начальный период её промерзания, тем интенсивнее осуществляется миграция поч-

венной влаги к фронту промерзания, соответственно, увеличивается льдистость почвы и происходит закупорка почвенных пор льдом. В результате весной в период снеготаяния потери на впитывание талых вод в промерзшую почву снижаются.

В табл. 3 приводятся результаты оценки доли детерминированного вклада переменных, входящих в уравнение множественной регрессии для стока талых вод по Г.А. Алексееву [8]. В южном менее увлажненном бассейне (р. Мура) доля детерминированного вклада показателя водопроницаемости почвы (m_1 и m_2) в корреляционная связь оказывается примерно вдвое больше, чем для бассейна Чадобец, расположенного в средней и северотаежной подзонах. Аналогичная закономерность отмечается в Западной Сибири, где доля детерминированного вклада показателя водопроницаемости почвы заметно возрастает на юге лесной зоны.

В гидрологических прогнозах за критерий оптимальности (качества) методики прогноза принимается отношение σ/σ_0 , где σ – средняя квадратичная ошибка расчета (прогноза) стока талых вод, σ_0 – его стандартное отклонение [9. С. 56–60]. Критерий качества прогноза σ/σ_0 по представленным в табл. 3 уравнениям для рек Чадобец и Мура изменяется в пределах от 0,449 до 0,552.

Расчеты показали, что наименьшие ошибки и лучший критерий качества получены в том случае, если в качестве характеристики водопроницаемости почвы принять показатель m_2 , определяемый по формулам (3) и (4), в которых для р. Мура учитывается расход воды за ноябрь по г.п. р. Мура – с. Ирба и температура почвы на глубине 0,2 м за ноябрь по ст. Ванавара; для р. Чадобец учитывается расход воды за ноябрь по г.п. р. Чадобец – с. Яркино и температура почвы на глубине 0,2 м по ст. Ванавара за январь. Уравнения показателей водопроницаемости почвы m_2 для бассейнов Чадобец и Мура имеют вид

$$\text{для р. Мура } m_2 = 1,74Q_{11} - 2,61t_{n11}, \quad (3)$$

$$\text{для р. Чадобец } m_2 = 0,937Q_{11} - 3,57t_{n1}. \quad (4)$$

Окончательно линейные уравнения для прогноза весеннего стока рек Чадобец и Мура имеют вид:

$$\text{для р. Мура } Y = 0,430(S+x) + m_2 - 48,2, \quad (5)$$

$$\text{для р. Чадобец } Y = 0,608(S+x) + m_2 - 114,4. \quad (6)$$

Третий способ. На основе полученных выше выводов перейдем к рассмотрению результатов оптимизации параметров нелинейных водно-балансовых зависимостей для стока талых вод. С учетом ранее выполненных исследований [6, 9–11] уравнения водно-балансовых зависимостей имеют вид

$$Y = \alpha \left\langle H + U - P_{\max} \left[1 + \left(\frac{H+U}{P_{\max}} \right)^{-n} \right]^{-1/n} \right\rangle, \quad (7)$$

$$H = S + x - (J + Z), \quad (8)$$

$$J + Z = b(X + U) \left[1 - f \left(\frac{m - m_{\min}}{m - m_{\min}} \right)^{St} \right], \quad (9)$$

$$U = d + c \times \lg[k(m - m_{\min})^{St} + 1], \quad (10)$$

где $\alpha = K_c(1 - \omega)$ – сборный коэффициент, учитывающий спадовые потери (через коэффициент K_c) и долю постоянно бессточной площади в речном бассейне (ω); H – слой заполнения водоудерживающей емкости, равный поступлению воды в период снеготаяния ($S+x$) за вычетом потерь на испарение и инфильтрацию ($J+Z$); U – слой начального (на момент начала снеготаяния) заполнения водоудерживающей емкости (зависит от характеристик осеннего увлажнения и промерзания); P_{\max} – параметр потерь, учитывающий водоудерживающую емкость бассейна в условиях наиболее низкого предшествующего увлажнения (P_{\max} принято 200 мм) [10. С. 10]; n – параметр, характеризующий нелинейный характер распределение водоудерживающей емкости на площади водосбора.

В уравнениях (9), (10) переменные b, f, d, c, st – коэффициенты; m_2 – комплексный показатель водопроницаемости почв; m_{\min} – минимальная за период наблюдений величина этого показателя, \bar{m}_2 – средняя многолетняя величина комплексного показателя водопроницаемости почв. В уравнении (10) k – масштабный сомножитель (согласно [11] принят 0,10). Если показатель водопроницаемости почв \bar{m} выражается числом второго или большего порядка, то $k = 0,10$; если числом первого порядка, то $k = 1,0$.

Смысл коэффициента d следующий. В годы с предельно низким осенним увлажнением $m = m_{\min}$, откуда на основе (10) $U = U_{\min} = d$. Иными словами, коэффициент d представляет минимально возможный слой начального заполнения водоудерживающей емкости (U_{\min}) в ландшафтных условиях рассматриваемого бассейна.

Последовательность оценки параметров водно-балансовых зависимостей с применением методов оптимизации и линейной регрессии приводится в [10. С. 10–11]. Результаты оценки представлены в табл. 4.

Согласно принятой в гидрологических прогнозах шкале оценки качества полученные оценки критерия σ/σ_0 характеризуют методику как хорошую. Результаты оптимизации параметров водно-балансовых зависимостей подтвердили полученные выше выводы относительно репрезентативности принятого в расчет показателя водопроницаемости почвы m_2 (табл. 4).

В табл. 5 приведены средние за период наблюдений характеристики составляющих потерь талых вод для исследуемых рек, рассчитанные по уравнениям (7)–(10), параметры которых приняты по результатам оптимизации.

Таблица 4

Уравнения с наилучшими критериями качества

Вид уравнений для Y	Параметры								Осеннее увлажнение	Критерий качества
	d	c	b	a	f	n	P_{\max}	st	m	σ/σ_0
$Y = 0,950 \left\{ H - 200 \left[1 + \left(\frac{H}{200} \right)^{-1,8} \right]^{-\frac{1}{1,8}} \right\}$ $H = S + x - (J + Z) + U$ $U = 29,8 + 13,7 \times \lg[0,1(m_2 - 31,3)^{0,14} + 1]$ $J + Z = 0,4(X + U) \left[1 - 0,64 \left(\frac{m_2 - 31,3}{16,4} \right)^{0,14} \right]$ $m_2 \text{ (см. табл. 3)}$	р. Чадобец – с. Яркино									
	29,8	13,7	0,40	0,95	0,64	1,80	200	0,14	$m-f(Q, t_n)$	0,431
$Y = 0,999 \left\{ H - 200 \left[1 + \left(\frac{H}{200} \right)^{-1,31} \right]^{-\frac{1}{1,31}} \right\}$ $H = S + x - (J + Z) + U$ $U = 38,1 + 12,5 \times \lg[0,1(m_2 - 8,82)^{1,6} + 1]$ $J + Z = 0,38(X + U) \left[1 - 0,23 \left(\frac{m_2 - 8,82}{16} \right)^{1,6} \right]$ $m_2 \text{ (см. табл. 3)}$	р. Мура – с. Ирба									
	38,1	12,5	0,38	0,99	0,23	1,31	200	1,6	$m-f(Q, t_n)$	0,440

Средние за многолетний период суммарные потери на водосборе за время половодья (P_A) в бассейне р. Чадобец на 35% больше, чем в бассейне р. Мура. Это обстоятельство объясняется существенным превышением слоя поступившей воды в период снеготаяния в бассейне р. Чадобец по сравнению с бассейном р. Мура. Напомним, что с увеличением H возрастает объем воды, заполняющий водоудерживающую емкость бассейна [9. С. 100].

Согласно полученным оценкам (табл. 5) бассейны рр. Чадобец и Мура характеризуются инфильтрационно-емкостным типом водопоглощения с преобладанием емкостных потерь. В этом случае склоновый сток формируется после заполнения водоудерживающей емкости при условии, что поступление воды в период

снеготаяния на поверхность бассейна ($S+x$) превышает инфильтрацию воды в почву и испарение ($J+Z$). Этот механизм особенно ярко проявляется в лесу [12. С. 14–20]. Бассейны рек Чадобец и Мура покрыты лесом более чем на 90%, поэтому описываемый механизм как раз характерен для этой территории.

Инфильтрационные потери в бассейне р. Мура больше, чем у р. Чадобец. Объясняется это тем, что р. Мура расположена южнее, осадков там выпадает меньше и почвы менее увлажнены по сравнению с бассейном реки Чадобец. Кроме того, почвы в бассейне р. Мура отличаются более легким механическим составом. Совокупность этих факторов способствует более интенсивному впитыванию талой воды в почву в бассейне р. Мура.

Таблица 5

Средние за многолетний период составляющие потерь талого стока

Характеристика	Обозначение, размерность	Речной бассейн – пункт	
		Чадобец – Яркино	Мура – Ирба
Потери на водосборе (числитель: мм; знаменатель: % суммарных потерь)			
Сток бассейна	Y , мм	84	41,9
Слой воды, поступающий для заполнения водоудерживающей емкости	$H = S+x+U-(I+Z)$	233	138
Инфильтрация и испарение за период снеготаяния	$J+Z=b(S+x+U)\left[1-f\left(\frac{m-m_{\min}}{m-m_{\min}}\right)^{St}\right]$, мм	$\frac{44.6}{23}$	$\frac{54.3}{36}$
Емкостное задержание на водосборе	$P_{emk} = P_0\left[1+\left(\frac{H}{P_0}\right)^{-n}\right]^{-1/n}$, мм	$\frac{146}{77}$	$\frac{95.6}{64}$
Суммарные потери на водосборе за период половодья	$P_A = P_{emk} + (J+Z)$, мм	$\frac{191}{100}$	$\frac{150}{100}$

Выполненный анализ позволяет сформулировать следующие выводы.

1. Ландшафтно-гидрологические условия бассейнов рек Мура и Чадобец подобны бассейну бокового притока Богучанского водохранилища. Существует тесная связь между объемом бокового притока в Богучанское водохранилище за второй квартал и весенним стоком указанных рек-аналогов. Эта связь положена в основу прогноза бокового притока в водохранилище Богучанской ГЭС с использованием зависимостей (5)–(6), установленных для рек Мура и Чадобец.

2. Показатель водопроницаемости почвогрунтов бассейна (m_2) рекомендуется оценивать по величине расхода воды за ноябрь и температуре почвы на глубине 0,2 м за январь и ноябрь. Расход воды характеризует общее увлажнение бассейна в начале зимы. Температура почвы в начальный период её промерзания характеризует интенсивность миграции почвенной влаги к фронту промерзания и, соответственно, увеличение льдистости почвы, приводящее к закупорке почвенных пор льдом.

3. Линейные уравнения (5) и (6) характеризуются достаточно высокими показателями тесноты связей (коэффициенты корреляции соответственно 0,881 и 0,883). Критерий качества этих зависимостей σ/σ_0 для р. Чадобец составляет 0,495, для р. Мура – 0,449, что характеризует методику расчета стока талых вод как хорошую.

4. Интегральные уравнения инфильтрационно-емкостной модели формирования стока для рек Чадобец и Мура (табл. 4) характеризуются следующими критериями качества σ/σ_0 : для р. Чадобец – 0,431, для р. Мура – 0,440. Преимущество использования интегральных уравнений для прогноза стока талых вод состоит в том, что они более обоснованно аппроксимируют его зависимость от действующих факторов с учетом ее нелинейности. Эта особенность может иметь существенное значение в годы с экстремально высокими или экстремально низкими значениями исходных аргументов – количества поступившей воды ($S+x$) и показателей водопроницаемости почвогрунтов [12. С. 21].

ЛИТЕРАТУРА

1. Раковская Э.М., Давыдова М.И. Физическая география России. М. : Владос, 2001. Ч. 2. 304 с.
2. Путинцев Л.А. Компьютерная модель прогноза притока воды в водохранилище Богучанской ГЭС // География, история и геозология на службе науки и инновационного образования : материалы междунар. науч.-практ. конф. Красноярск : Красноярск. гос. пед. ун-т им. В.П. Астафьева, 2011. С. 81–84.
3. Петенков А.В. Гидрологические основы водопользования ресурсами малых рек бассейнов Верхнего Енисея, Верхнего Чулыма и Нижней Ангары. Красноярск : СибНИИГМИ, 1990. 208 с.
4. Бураков Д.А. Гидрологический анализ весеннего половодья в лесной зоне Западно-Сибирской равнины // Вопросы географии Сибири. Томск, 1978. Вып. 10. С. 69–89.
5. Burakov D.A. Longterm Forecasting of Snowmelt Runoff. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Hydrological systems modeling, 2011. Vol. I. P. 102–136.
6. Бураков Д.А., Литвинова О.С. Водно-балансовые зависимости для прогноза стока талых вод в природных зонах юга Западно-Сибирской равнины // География и природные ресурсы. Иркутск, 2010. № 3. С. 111–120.
7. Бураков Д.А., Иванова О.И. Анализ формирования и прогноз стока весеннего половодья в лесных и лесостепных бассейнах рек Сибири. М. : Метеорология и гидрология, 2010. № 6. С. 87–100.
8. Алексеев Г.А. Объективные методы выравнивания и нормализации корреляционных связей. Л. : Гидрометеиздат, 1971. 363 с.
9. Попов Е.Г. Гидрологические прогнозы. Л. : Гидрометеиздат, 1979. 256 с.
10. Бураков Д.А. Основы гидрологических прогнозов объема и максимума весеннего половодья в лесной зоне Западно-Сибирской равнины // Вопросы географии Сибири. Томск, 1978. Вып. 11. С. 3–49.
11. Литвинова О.С. Условия формирования и прогнозы весеннего половодья на реках южно-таежного, лесостепного и степного междуречья Оби и Иртыша : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск, 2011. С. 17–19. URL: <http://www.irigs.irk.ru/aref/Litvinova.pdf>
12. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ / под ред. Е.Г. Попова. Л. : Гидрометеиздат, 1989. 357 с.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 22 июля 2015 г.

METHODS OF LONG-TERM FORECAST OF THE SIDE INFLOW INTO THE RESERVOIR OF THE BOGUCHANSKAYA HPP ON THE ANGARA RIVER

Tomsk State University Journal, 2015, 398, 243–250. DOI: 10.17223/15617793/398/38

Putintsev Lev A. Krasnoyarsk State Agrarian University (Krasnoyarsk, Russian Federation). E-mail: leo77789@mail.ru

Keywords: spring freshet; evaporation; infiltration; water-retaining capacity; capacitive absorption; runoff hydrograph.

Angara is the largest inflow of the Yenisei, a unique river of our country. Its main distinctive feature is the natural overregulation of the river drain of Lake Baikal. This circumstance, as well as favorable topographical and ecological conditions, leads to a fact that the cascade of the hydroelectric power station on the Angara is one of the most effective in Russia by technical and economic indicators. The article investigates the factors influencing the drain of high spring water and develops the method of long-term forecast. The Chadobets and the Mura rivers are used as basins-analogs. The Chadobets characterizes the right-bank territory of the Boguchansky reservoir, the Mura its left-bank. These rivers were used for the calculation of a daily lateral inflow of water into the Boguchansky reservoir which is connected with the drain of thawed snow of the rivers-analogs (the coefficient of correlation is 0.891). Therefore, it is necessary to develop a method of spring drain forecast of the rivers for long-term forecast of water inflow into the Boguchansky reservoir. The method of the forecast is based on the infiltration and capacitor model of absorption of water by a reservoir (E.G. Popov, D.A. Burakov). In this model, indirect indicators of water penetration into the soil before the snowmelt are various characteristics of the pre-spring condition of the river basin. Their selection is made in the following ways: 1) on the basis of pair correlation of the drain of thawed snow (Y) with various indicators of pre-spring moistening and frost penetration in the reservoir; 2) by calculation of coefficients of multiple linear correlation of the drain of thawed snow and the factors determining it (water-

supplies in the snow cover, rainfall during the snowmelt and various indirect indicators of water penetration into the frozen soil); 3) by optimization of parameters of nonlinear approximation of the water-balance dependence for the forecast of the drain of thawed snow following from the infiltration and capacitor model. The analysis showed that the best characteristics of water penetration into the reservoir are consumption of the water of the rivers-analogs for November and temperature of the soil at a depth of 0.2 m. The optimization parameters of the infiltration-capacitive model give equations for the forecast of the melted water runoff of the rivers-analogues, which is closely associated with the lateral inflow into the reservoir of the Boguchanskaya HPP. The rating scale adopted in hydrological forecasts characterizes the forecast of the lateral inflow into the reservoir of the Boguchanskaya HPP as "good".

REFERENCES

1. Rakovskaya, E.M. & Davydova, M.I. (2001) *Fizicheskaya geografiya Rossii* [Physical Geography of Russia]. Pt. 2. Moscow: Vldos.
2. Putintsev, L.A. (2011) [Computer model of forecast of the inflow into the reservoir of the Boguchanskaya HPP]. *Geografiya, istoriya i geoekologiya na sluzhbe nauki i innovatsionnogo obrazovaniya* [Geography, history and geo-ecology in the service of science and innovative education]. Proc. of the International Scientific and Practical Conference. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Pedagogical University. pp. 81–84. (In Russian).
3. Petenkov, A.V. (1990) *Gidrologicheskie osnovy vodopol'zovaniya resursami malyykh rek basseynov Verkhnego Eniseya, Verkhnego Chulyma i Nizhney Angary* [Hydrological foundations of water resources use of small rivers of the Upper Yenisei, Upper Chulym and Lower Angara basins]. Krasnoyarsk: SibNIIGMI.
4. Burakov, D.A. (1978) *Gidrologicheskiy analiz vesennego polovod'ya v lesnoy zone Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Hydrological analysis of spring flood in the forest zone of the West Siberian plain]. *Voprosy geografii Sibiri*. 10. pp. 69–89.
5. Burakov, D.A. (2011) Longterm Forecasting of Snowmelt Runoff. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). *Hydrological systems modeling*. I. pp. 102–136.
6. Burakov, D.A. & Litvinova, O.S. (2010) *Vodno-balansovye zavisimosti dlya prognoza stoka talykh vod v prirodnnykh zonakh yuga Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Water-balance dependencies for the forecast of melt water runoff in natural areas of the south of the West Siberian plain]. *Geografiya i prirodnye resursy – Geography and Natural Resources*. 3. pp. 111–120.
7. Burakov, D.A. & Ivanova O.I. (2010) *Analiz formirovaniya i prognoz stoka vesennego polovod'ya v lesnykh i lesostepnykh basseynakh rek Sibiri* [Analysis of formation and flow forecast of spring flood in the forest and steppe basins of Siberia]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 6. pp. 87–100.
8. Alekseev, G.A. (1971) *Ob'ektivnye metody vyravnivaniya i normalizatsii korrelyatsionnykh svyazey* [Objective methods of alignment and normalization of correlations]. Leningrad: Gidrometeoizdat.
9. Popov, E.G. (1979) *Gidrologicheskie prognozy* [Hydrological forecasts]. Leningrad: Gidrometeoizdat.
10. Burakov, D.A. (1978) *Osnovy gidrologicheskikh prognozov ob'ema i maksimuma vesennego polovod'ya v lesnoy zone Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Fundamentals of hydrological forecasts of the volume and maximum of spring flood in the forest zone of the West Siberian plain]. *Voprosy geografii Sibiri*. 11. pp. 3–49.
11. Litvinova, O.S. (2011) *Usloviya formirovaniya i prognozy vesennego polovod'ya na rekakh yuzhno-taevnogo, lesostepnogo i stepnogo mezhdurech'ya Obi i Irtysha* [Formation conditions and forecasts of spring floods on the rivers of southern taiga and steppe between the rivers Ob and Irtysh]. Abstract of Geography Cand. Diss. Irkutsk. [Online]. Available from: <http://www.irigs.irk.ru/aref/Litvinova.pdf>.
12. Popov, E.G. (ed.) (1989) *Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam* [Guide to hydrological forecasts]. V. 1. Leningrad: Gidrometeoizdat.

Received: 22 July 2015