

# МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОГО РАСЧЕТА И ПРОГНОЗА СУТОЧНОГО ПРИТОКА ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ ЗЕЙСКОЙ ГЭС

*С.В. Борщ<sup>1</sup>, Д.А. Бураков<sup>2</sup>, Ю.А. Симонов<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации*

*<sup>2</sup>Красноярский государственный аграрный университет  
borsch@mecom.ru, simonov@mecom.ru*

## **Введение**

Приток воды в водохранилище является одной из ключевых характеристик, влияющих на режим эксплуатации ГЭС. Точный расчет притока, а также его своевременный прогноз создают предпосылку для принятия наиболее рациональной схемы регулирования водохранилища, а значит, повышают экономическую эффективность и безопасное использование сооружения. Задача расчета и прогноза притока воды в водохранилища особо остро стоит в горных районах, где горный характер водосбора водохранилища, метеорологические условия способствует высокой изменчивость притока речных вод, как в течение года, так и в межгодовой перспективе.

Водоохранилище Зейской ГЭС является одним из ярких примеров водохранилища с горным режимом бокового притока – его основные притоки стекают с южного склона и в период повышенных осадков (например, при выходе насыщенных тропической влагой циклонов) дают повышенный, а иногда и экстремальный сток. Например, в августе 2013 года в ходе интенсивных ливневых осадков приток в Зейское водохранилище принял наибольшее значение за весь период наблюдений: средняя интенсивность притока составила  $5300 \text{ м}^3/\text{с}$  (300 % нормы). В такие периоды точные

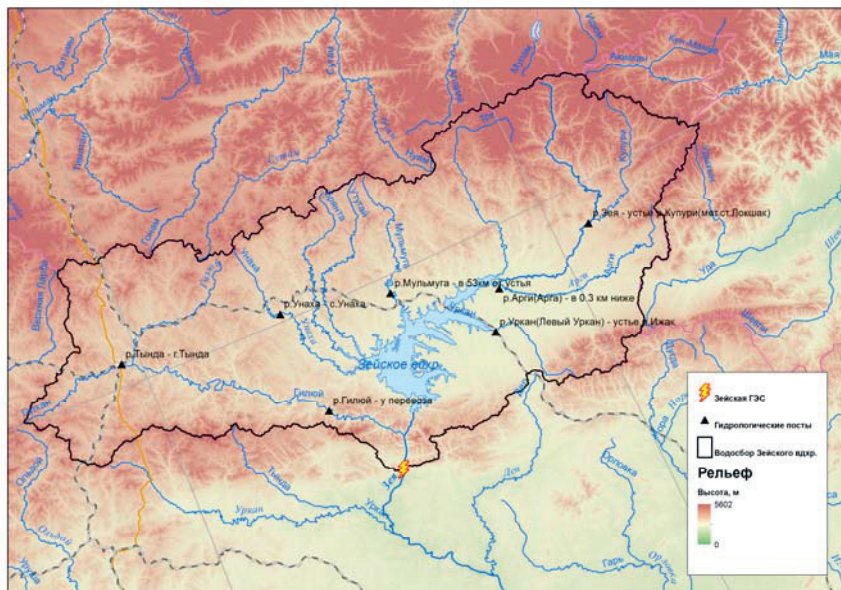
расчеты и прогнозы притока речных вод помогают скорректировать режим работы гидроузла для снижения рисков затопления населенных пунктов, расположенных ниже по течению реки, а также безопасность самого сооружения. Анализ катастрофического притока воды к водохранилищу в июле–августе 2013 г. показал острую необходимость в разработке методик расчета и прогноза суточного притока воды к водохранилищу для своевременного расчета графика управления работой ГЭС.

В ходе реализации «Технического проекта восстановления, модернизации и развития гидрометеорологической сети наблюдений и системы гидрологического прогнозирования в бассейне реки Амур» были разработаны и внедрены в оперативный автоматизированный счет методики расчета и прогноза суточного притока воды в водохранилище Зейской ГЭС. Разработанная методика расчета суточного притока, основанная на так называемом гидрометрическом методе, пришла на смену используемой до этого «водно-балансовой» методике расчета притока, эффективность которой невысока на суточном шаге по времени. Методика притока воды в водохранилище основана на использовании концептуальной модели формирования стока на водосборе Зейского водохранилища. Она позволяет выпускать прогноз с заблаговременностью до 4 суток с использованием данных метеорологического прогнозирования четырех метеорологических моделей. Эффективность методики прогнозирования была оценена на архивных данных, а также в ходе оперативных испытаний. С июня 2014 года разработанные методы функционируют в автоматизированном режиме, выпускаемая прогностическая и аналитическая продукция доводится до пользователей в режиме реального времени с помощью Веб-ГИС-технологий.

### **Характеристика бассейна Зейского водохранилища**

Река Зея берет начало на южных склонах системы Станового хребта (хр. Токинский Становик). В верхнем течении местность имеет преимущественно горный характер. В месте пересечения хребта Тукурингра-Соктахан река течет в глубоком скалистом ущелье. Плотина Зейской ГЭС построена в месте так называемых

Зейских Ворот, где река прорезает горную цепь хр. Тукурингра-Соктахан (рис. 1, табл. 1).



**Рис. 1. Карта высот, гидрографии и наблюдательной сети в бассейне Зейского водохранилища.**

Территория бассейна Зейского водохранилища представляет собой сочетание возвышенных плато, обширных равнин, средне-высотных гор, гряд и увалов. На севере система Станового хребта протянулась в широтном направлении почти на 700 км. Южнее параллельно ему протянулась гряда из последовательно расположенных хребтов Тукурингра-Соктахан. Между этими двумя четко выраженными орографическими элементами находится обширная межгорная котловина, наиболее низкая часть которой называется Верхне-Зейской равниной. Возникла она на месте опускания кристаллических пород и заполнена песчано-глинистыми и песчано-гравелистыми рыхлыми породами. Мощность рыхлых отложений на равнине до нескольких сотен метров. Равнина заболочена, а наиболее пониженная часть равнины залита водами Зейского водохранилища. Средняя высота равнины – 300–500 м.

Таблица 1

## Распределение высот в бассейне Зейского водохранилища

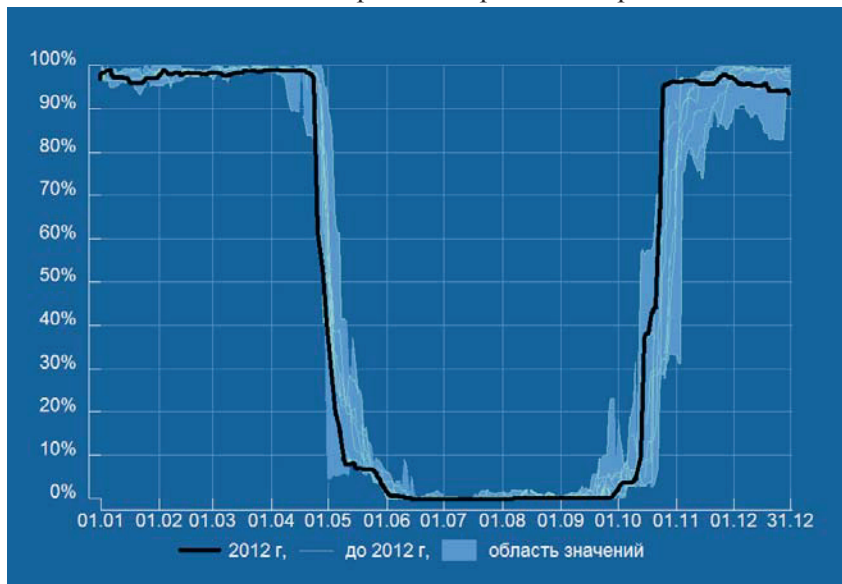
Бассейн Зейского водохранилища	Площадь		Мин. высота, м	Средняя высота, м	Макс. высота, м
	км <sup>2</sup>	%			
Весь бассейн	82033	100	209	651	2191
Высотные зоны бассейна					
209–400 м	12876	15,7	209	346	399
400–600 м	28197	34,4	400	502	599
600–800 м	22051	26,8	600	687	799
800–1000 м	10138	12,4	800	888	999
1000–2192 м	8771	10,7	1000	1211	2191

На склонах Станового хребта преобладает лиственничная тайга, выше 1200 м – кедровый стланик и горная тундра. На южнее расположенных хребтах Тукурингра-Соктахан произрастают лиственничные леса и березняки с вкраплениями маньчжурских видов, представленных липой, лимонником и другими растениями. Выше лесов зона зарослей кедрового стланика, сменяющаяся каменными россыпями. В пределах Верхнезейской равнины преобладают разреженная лиственничная тайга и обширные мари.

Годовое количество осадков в северо-восточных горных и восточных районах составляет от 900 до 1000 мм. В районах, тяготеющих к среднему и нижнему течению реки Зеи, осадков выпадает меньше. Так, в районе поселка Ерофей Павлович – до 500 мм, в Благовещенске – до 550 мм. Для всей территории характерен летний максимум осадков, что обусловлено муссонностью климата. За июнь, июль и август может выпасть до 70 % годовой нормы осадков.

Средние многолетние наибольшие запасы воды в снеге в бассейне составляют 70–90 мм, достигая на высотах более 1500 м 300–500 мм и более. По этой причине водный режим рек бассейна Зеи по сравнению с другими реками Дальнего Востока характеризуется более отчетливо выраженным весенним половодьем.

По данным космического мониторинга заснеженности (рис. 2), снеготаяние начинается в середине апреля и завершается в мае.



**Рис. 2. Динамика заснеженности бассейна Зейского водохранилища (2004–2012 гг.).**

Обращает внимание задержка окончания снеготаяния в самой нижней высотной зоне, что вызвано более поздним освобождением от снега и льда Зейского водохранилища. Например, 17 мая 2011 г. в нижней высотной зоне заснеженность составила 14,19 %, тогда как на выше расположенных высотных зонах от 400 до 1000 м снег полностью сошел. И только в самой верхней зоне (1000–2192 м) заснеженность составила 6,98 %.

### **Приток воды в водохранилище Зейской ГЭС**

По величине среднего годового стока исследуемую территорию условно можно разделить на 4 зоны: зона пониженного стока с годовыми модулями, изменяющимися в пределах от 3 до 6 л/с км<sup>2</sup> (в эту зону входит Верхнезейская равнина); зона умеренного стока, характеризующаяся величинами годового модуля стока

от 6,1 до 10 л/с км<sup>2</sup> (зона включает среднегорье и высокие равнины); зона повышенного стока: величины модуля стока изменяются от 10,1 до 18 л/с км<sup>2</sup> (охватывает приводораздельную часть хребта Тукурингра-Соктахан); зона высокого стока: модуль стока более 18 л/с км<sup>2</sup> (район истоков р. Зея, хр. Токинский Становик).

Сильно расчлененный рельеф и наличие вечной мерзлоты благоприятствуют быстрому стоку поверхностных вод. При этих условиях коэффициент стока является довольно высоким, обычно около 0,6 и выше.

Как отмечено выше, водный режим, по сравнению с другими реками Дальнего Востока, характеризуется более отчетливо выраженным весенним половодьем, которое длится в среднем 20–30 дней, и высокими летними дождевыми паводками, обуславливающими иногда сильные наводнения. Наводнение 1928 года, повлекшее за собой катастрофические последствия, в основном было вызвано мощным паводком на Зее.

В зимний период Зея исключительно маловодна, что характерно для рек в районах вечной мерзлоты. До строительства Зейской ГЭС у города Зеи, например, во время паводков приток воды достигал 14200 м<sup>3</sup>/сек и выше, а зимой падал до 1,5 м<sup>3</sup>/сек.

В 1985 г. у г. Зея была построена Зейская ГЭС. Помимо выработки электроэнергии, не менее важной функцией Зейской ГЭС является защита Приамурья от наводнений, причиняющих огромный ущерб. В 2007 году, когда максимальный приток воды в Зейское водохранилище достигал 15200 м<sup>3</sup>/с, плотина Зейской ГЭС предотвратила катастрофическое наводнение.

### **Расчет суточного притока воды в Зейское водохранилище**

Суточный приток воды в водохранилище Зейской ГЭС определяет режим сборов данного водохранилища, в связи с этим прогноз суточного притока может значительным образом смягчить последствия катастрофического паводка на р. Зее. Так, например, во время катастрофического паводка на р. Амур в 2013 г. Зейское водохранилище аккумулировало значительный объем речного стока, что позволило снизить величины сбросных расходов воды из водохранилища и, соответственно, оказать положительное влияние на стабилизацию уровня режима рек Зеи и Среднего

Амура. Исходной информацией для прогноза притока воды в водохранилище является расчет притока воды. Как известно, существуют два основных метода расчета притока воды в водохранилище: по сумме расходов впадающих рек (так называемый гидрометрический метод), а также по уравнению водного баланса водохранилища. В момент разработки методики прогноза в наличии были значения рассчитанного притока с помощью уравнения водного баланса водохранилища в соответствии с выражением

$$Q_{np} = Q_{сб} + \frac{V_k - V_n}{T},$$

где  $Q_{сб}$  – сброс воды из гидроузла водохранилища, м<sup>3</sup>/с;  $V_k$ ,  $V_n$  – объемы воды в водохранилище на конец и начало интервала, соответственно, м<sup>3</sup>;  $T$  – продолжительность интервала, с.

Определение притока воды по уравнению водного баланса водохранилища является более простым и в ряде случаев единственно возможным методом, например, если на реках, впадающих в водохранилище, не ведутся наблюдения за стоком. В случае наличия наблюдений за стоком рек-притоков в водохранилище, данный метод является менее предпочтительным для расчета притока, нежели гидрометрический метод по ряду причин. При использовании водно-балансового способа в вычисленную через уравнение водного баланса величину притока в неявном виде входят все неучтенные элементы водного баланса (испарение, осадки, грунтовый приток и сток и т. д.), а также ошибки расчета [5]. Кроме того, по мере уменьшения интервала, за который рассчитывается приток, точность гидрометрического метода падает значительно медленнее, чем водно-балансового в связи с погрешностями учета аккумуляции воды в водохранилище из-за денивиляции водной поверхности водохранилища. Чем больше доля аккумуляции в водном балансе водохранилища, тем больше ошибки расчета суточного притока можно получить, например, она может превышать в десятки раз ошибку за месяц. В связи с этим, при небольшой длительности интервала (в первую очередь – одни сутки) рекомендуется рассчитывать приток с помощью гидрометрического метода. Предложенный метод расчета суточного притока воды в водохранилище Зейской ГЭС представлен ниже.

Бассейн Зейского водохранилища характеризуется чрезвычайно разветвленной системой притоков (рис. 3). Основным притоком является р. Гиллой, который впадает справа в Зейское водохранилище. Он имеет длину 545 км и площадь бассейна 22 500 км<sup>2</sup>. Вторым по величине притоком является р. Арги (Арга), далее по величине следуют реки Мульмуга, Уркан, Унаха и др. Для расчета суточного бокового притока в Зейское водохранилище в его бассейне выделено 5 районов, в каждом из которых выбран бассейн-аналог с данными по стоку воды (табл. 2).

В общем виде боковой приток  $Q_b(t)$  (м<sup>3</sup>/с) определяется по формуле

$$Q_b(t) = \sum_{i=1}^5 Q_{ai}(t) K_i,$$

где  $Q_b(t)$  – среднесуточный расход воды бассейна-аналога;  $K_i$  – коэффициент стоковой приводки,  $K_i = F_i/F_{ai}$  (табл. 2), где  $F_i$  – площадь  $i$ -го района бассейна водохранилища (рис. 3);  $F_{ai}$  – площадь  $i$ -го бассейна-аналога. Расчет притока по данной формуле не учитывает асинхронность режима расходов (и, соответственно, притока воды к водохранилищу) на различных реках водосбора Зейского водохранилища.

Таблица 2

**Реки-аналоги для расчета притока воды в водохранилище  
Зейской ГЭС**

Номер района (бассейна-аналога)	Индекс створа бассейна-аналога	Бассейн - аналог	Расход воды реки-аналога $Q_{ai}$ , м <sup>3</sup> /с	Коэффиц. стоковой приводки $K_i$
1	06331	р. Гиллой – у перевоза	$Q_{a1}$	1,08
2	06329	р. Унаха – с. Унаха	$Q_{a2}$	6,86
3	06323	р. Мульмуга – 53 км от устья	$Q_{a3}$	5,62
4	06302	р. Арги (Арга) – 0,3 км от устья	$Q_{a4}$	3,08
5	06319	р. Уркан (Левый Уркан) – устье р. Ижак	$Q_{a5}$	4,12



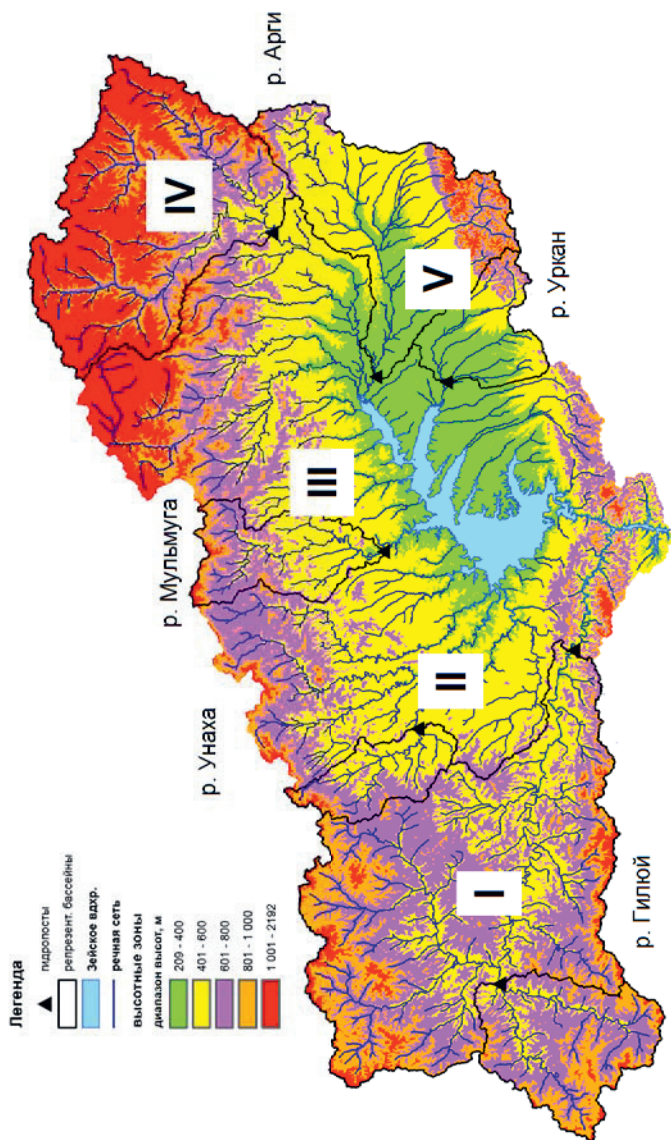


Рис. 3. Схематизация водосбора водохранилища Зейской ГЭС (районы и высотные зоны).

Гидрометрические створы на реках-притоках расположены в основном на некотором отдалении от устьевых створов (рис. 1, 3). В связи с этим, более обоснованной представляется схема расчета бокового притока с учетом времени руслового добега от замыкающих створов рек-аналогов до водохранилища по кривым добега. С этой целью использована карта бассейн р. Амур с изохронами времени руслового добега, разработанная специалистами ФГБУ «Дальневосточное УГМС». В данном случае расчетная формула для расчета суточного притока воды в Зейское водохранилище имеет вид:

$$Q_{np}(t) = 3,08Q_{a4}(t) + 4,12Q_{a5}(t) + 3,37Q_{a3}(t) + 2,25Q_{a3}(t-1) + 3,43Q_{a2}(t) + 3,43Q_{a2}(t-1) + 0,54Q_{a1}(t) + 0,54Q_{a1}(t-1),$$

где обозначения расходов воды бассейнов аналогов  $Q_{a1} \dots, Q_{a5}$  приведены в табл. 2;  $t$  – индекс суток выпуска прогноза,  $(t-1)$  – индекс предшествующих суток. Для оценки доли притока воды с первого, второго и третьего бассейнов-аналогов (коэффициентов при членах  $Q_{a1} \dots, Q_{a3}$ ) были исследованы размеры рек, их расположение и время руслового добега до водохранилища.

Расчитанный по данной формуле суточный приток воды к водохранилищу Зейской ГЭС отличается от расчета, проводимого по воднобалансовому методу для суточного временного интервала. В декадном разрешении оба метода показывают высокую сходимость (рис. 4). Как уже было сказано выше, для расчета притока суточного разрешения предпочтение должно быть отдано разработанному методу. Приток воды по методу водного баланса может быть использован для контроля результатов.

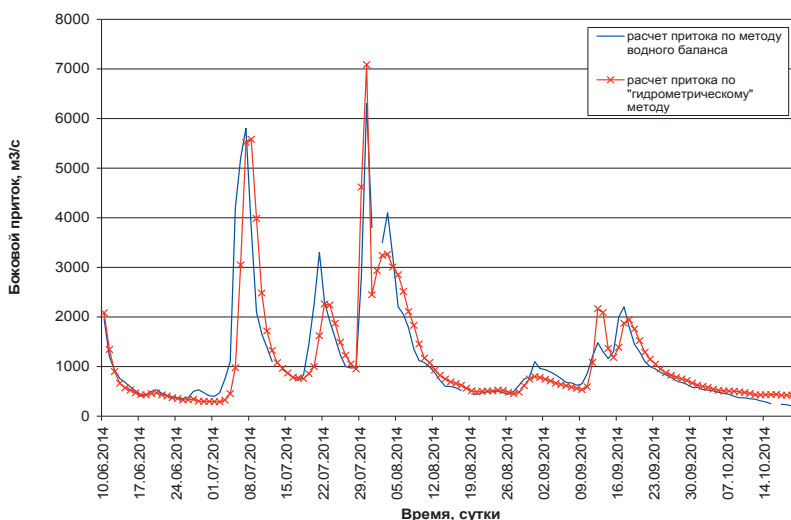
### **Прогноз суточного притока воды в водохранилище Зейской ГЭС**

Для реализации прогноза притока воды в Зейское водохранилище к территории его бассейна была адаптирована модель формирования стока, разработанная под руководством Д.А. Буракова. В основе данной модели лежит ряд следующих принципов [2–4]:

– в бассейне водохранилища выделены квазиоднородные ландшафтно-гидрологические районы и высотные зоны (см. табл. 1, рис. 3);

– в районах и 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.



**Рис. 4. График бокового притока воды к Зейскому водохранилищу, рассчитанного по методу водного баланса и по гидрометрическому методу (предложенный в рамках данной работы).**

Для реализации математической модели прогноза ежедневных расходов (уровней) воды в рассматриваемом бассейне были выделены высотные зоны (см. табл. 1, рис. 3). В качестве показателей увлажнения на момент начала дождя использовались расход (уровень) воды или индекс предшествующих осадков  $m_t$  [4], определяемый по следующей модернизированной формуле:

$$m_t = (S + U)K^{t-t_s} + \sum_{i=0}^{i=t-t_s} x_{t-i} K_{t-i}^i, \quad K_{t-i} = K_0 \exp[-c\theta_{t-i}], \quad (1)$$

где  $S$  – запас воды в снежном покрове в конце зимы;  $U$  – слой воды, заполняющий водоудерживающую емкость бассейна в конце зимы, определяемый по эмпирической зависимости от показателя осеннего увлажнения;  $K_0$ ,  $c$  – коэффициенты;  $x_{t-i}$  – количество осадков за сутки  $(t-i)$ ;  $K_{t-i}$  – коэффициент, зависящий от средне-суточной температуры воздуха  $\theta$ ;  $N$  – период суммирования осадков (начало суммирования осадков относится к моменту завершения снеготаяния  $t_s$ ). Расчеты показали, что оба рассмотренных показателя предпаводочного увлажнения имеют примерно одинаковую репрезентативность.

Модель состоит из подмоделей, в блоках которых для высотных зон каждого района проводятся расчеты снегонакопления, снеготаяния, водоотдачи талой и дождевой воды, склонового притока и руслового добегаия [3, 4]. Модель использует как метеорологическую информацию, так и данные наблюдений за уровнями воды в речной системе. Запасы воды в руслах рассчитываются по наблюдениям ежедневных уровней за 8 и 20 ч. Влияние русловых запасов на прогнозируемый расход (уровень) возрастает вниз по течению реки.

Отрезки времени, в течение которых суточное поступление воды на поверхность бассейна превышает суточное испарение и просачивание, образуют последовательные паводкообразующие периоды. Для каждых суток паводкообразующего периода рассчитывается водоотдача высотных зон по схеме Е.Г. Попова. В качестве показателей увлажнения на момент начала дождя использовался уровень воды одного из притоков, либо индекс предшествующих осадков. В основе подмодели динамичной составляющей склонового притока в русловую сеть  $q(t)$  лежит концепция динамичного (гравитационного) запаса воды  $W(t)$  на склонах, связанного с  $q(t)$  в общем случае не линейно [3, 4]:

$$W(t+1) = W(t) + \varphi(t) \cdot (h - Z - I)_{t+1} - q(t+1), \quad (2)$$

$$q(t) = \alpha \{0,50[W(t+1) + W(t)]\}^p, \quad (3)$$

где  $t$  – время;  $q(t)$  – относительная действующая площадь, в пределах которой происходит пополнение динамического запаса воды (изменяется от нуля в состоянии высыхания бассейна, до  $(1-\omega)$  при насыщении почвы водой);  $\omega$  – доля постоянно бессточной площади в бассейне;  $h$  – слой подачи дождевой (талой) воды за расчетный интервал;  $Z$  – испарение;  $I$  – впитывание, связанное с пополнением базисного стока и определяемое по расходу воды  $Q_{\min}$  в конце кривой истощения ( $I = 86,4 Q_{\min} / F$ ), мм/сут.;  $\alpha$  – переменный коэффициент, учитывающий гидравлические условия и другие факторы;  $p$  – показатель степени (в первом приближении  $p = 1$ );  $F$  – площадь водосбора.

В период поступления воды на водосбор  $\varphi(t)$  определяется по емкостной модели водопоглощения Е.Г. Попова [6]. Параметр поглощения дождевых или талых вод (максимальные потери) определяется по эмпирической зависимости от косвенных показателей предшествующего увлажнения бассейна. В период истощения склонового стока, когда  $(h - Z - I)_t < 0$ , учитывается процесс снижения действующей площади  $\varphi(t)$  по мере истощения запасов воды на склоне. Русловая трансформация склонового притока рассчитывается с помощью интеграла свертки

$$Q(t + \Delta t) = \left[ \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta t} q_i(t + \Delta t - \tau) f_{q_i}(\tau) d\tau \right] + Q_w(t + \Delta t) + Q_{\min}, \quad (4)$$

где  $Q(t + \Delta t)$  – расход воды в замыкающем створе;  $t$  – дата выпуска прогноза;  $\Delta t$  – заблаговременность прогноза;  $n$  – число ландшафтно-гидрологических районов, на которые разбит речной бассейн;  $q_i(t)$  – суммарный приток в русловую сеть с  $i$ -го района;  $f_{q_i}(\tau)$  – кривая добега бокового притока с  $i$ -го района (функция влияния), рассматриваемая как плотность распределения времени добега элементарных объемов воды в гидрологической системе [3, 4];  $Q_w(t + \Delta t)$  – составляющая расхода воды, обусловленная

истощением начального (на момент  $t$ ) запаса воды в русловой сети;  $Q_{\min}$  – устойчивое (базисное) питание реки.

Выразив запас воды в русловой сети в зависимости от высот уровней воды  $H_i(t)$  в пунктах наблюдений речной системы, получим следующее уравнение:

$$Q(t + \Delta t) = [c_0 \sum_0^{\Delta t} \int q_i(t + \Delta t - \tau) f_{q_i}(\tau) d\tau + \sum c_i (H_i(t) - H_{i\min})^{y1} + \sum c_{i+n} (H_i(t) - H_i(t-1))^{1/y2} + Q_{\min}], \quad (5)$$

где:  $Q(t + \Delta t)$  – прогнозируемый расход (уровень) воды в замыкающем створе (или приток воды в водохранилище);  $c_i$ ,  $y1$ ,  $y2$  – коэффициенты;  $H_{i\min}$  – минимальный уровень воды в  $i$ -м пункте речной системы, принятый за условный нуль отсчета;  $Q_{\min}$  – то же в замыкающем створе. Параметры формул отдельных блоков модели определяются сочетанием методов оптимизации и линейной регрессии.

Более подробное описание алгоритмов отдельных блоков модели и методика оптимизации ее параметров приводится в отчете «Усовершенствовать алгоритмы модели формирования весеннего стока, определения площади заснеженности на основе ИСЗ (на примере бассейнов рек Сибири)»: раздел темы 1.1.1.2 плана НИР и ОКР Росгидромета.

Для реализации модели используются данные наблюдений о ежедневных уровнях воды на гидрологических постах (табл. 3 – № 1–7) с 1 мая по 30 октября. Также необходимы ежедневные данные о суточных величинах осадков и температуры воздуха (табл. 3 – № 8–12). В качестве начальных условий необходимо задать величину водного эквивалента в снежном покрове на конец третьей декады апреля. Проверка модели на многолетних данных показала ее высокую эффективность – критерий качества расчета прогноза притока воды в водохранилище  $S/\sigma_{\Delta}$  принял значения менее 0,6 (табл. 4), что свидетельствует о хорошей эффективности прогностической методики. В качестве метеорологического входа на период заблаговременности были заданы данные наблюдений за температурами и осадками.

Таблица 3

Станции наземной сети, данные которых используются для выпуска оперативных расчетов и прогнозов притока воды

№	Индекс поста/станции	Гидрологический пост / метеорологическая станция
1	06331	р. Гиллой – у перевоза
2	06329	р. Унаха – с. Унаха
3	06323	р. Мульмуга – 53 км от устья
4	06302	р. Арги (Арга) – 0,3 км от устья
5	06319	р. Уркан (Левый Уркан) – устье р. Ижак
6	06265	р. Зея – устье р. Купури (мст. Локшак)
7	06334	р. Тында – г. Тында
8	31397	Февральск
9	31257	Береговой
10	31253	Бомнак
11	30499	Тында
12	31300	Зея

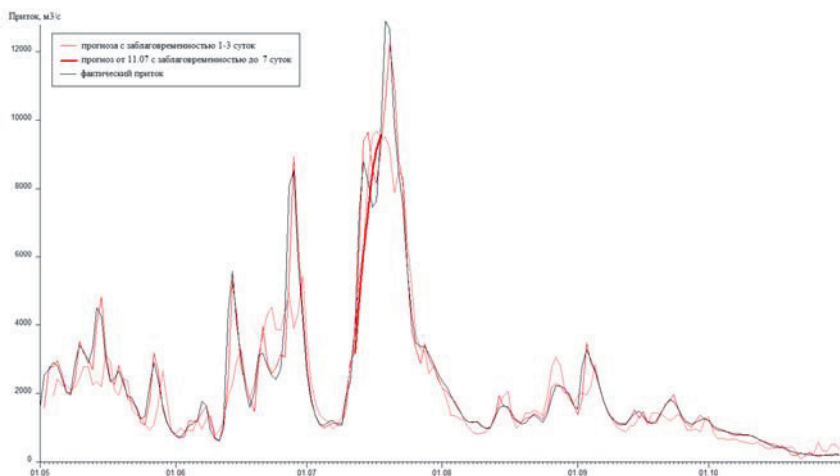
Таблица 4

Показатели качества расчета прогноза притока воды в водохранилище Зейской ГЭС за многолетний период наблюдений

Заблаговременность прогноза $\Delta t$ , сут	Средняя квадратичная ошибка прогноза $S$ , м <sup>3</sup> /с	Среднее квадратичное отклонение притока за период $\Delta t$ , $\sigma_{\Delta}$ , м <sup>3</sup> /с	Критерий качества методики $S/\sigma_{\Delta}$
1	245	461	0,53
2	480	814	0,59
3	605	1042	0,58
4	664	1180	0,56
5	687	1259	0,54
6	695	1205	0,53
7	696	1334	0,52

Качество разработанной прогностической методики было оценено с использованием архивного материала. В качестве примера на рис. 5 представлен гидрограф фактического и спрогнозирован-

ного суточного притока к Зейскому водохранилищу за многоводный 2007 г. В качестве входных значений осадков и температур использованы наблюдаемые значения, измеренные на метеорологических станциях водосбора (табл. 3). Из рисунка видна удовлетворительная точность описания фактического гидрографа притока. При этом прогнозы с заблаговременностью до 3 суток показывают хорошую сходимость с фактическими данными, выпущенный прогноз с начала паводка с заблаговременностью 7 суток также дает неплохое представление о будущем росте притока в водохранилище.



**Рис. 5. Прогноз притока в Зейское водохранилище за многоводный 2007 год.**

### **Реализация методик расчета и прогноза притока воды в оперативном режиме**

Представленные выше методики расчета и прогноза суточных значений притока воды в водохранилище Зейской ГЭС были реализованы в виде программных средств и внедрены в оперативный счет в рамках системы мониторинга и прогнозирования паводков в бассейне р. Амур в июне 2014 года. Для функционирования методики расчета притока воды в водохранилище используются



расчетные данные о расходах воды на гидрологических постах, расположенных на основных притоках Зейского водохранилища (см. табл. 3). Значения расходов воды рассчитываются в автоматизированном режиме на основе данных наблюдений за уровнями воды, а также зависимости уровней от расходов воды для каждого гидрологического поста. Расчет притока воды выпускается в 3.30 ч ВСВ (10.30 по Хабаровскому времени) спустя несколько минут после поступления данных наблюдений на гидрологических створах. В случае пропуска в наблюдении уровня воды, в системе заложен механизм восстановления (расчета) уровня воды на основе пространственной скоррелированности колебаний уровня воды на гидрологических постах рек водосбора Зейского водохранилища.

Оперативный прогноз притока воды в водохранилища Зейской ГЭС рассчитывается на основе данных наблюдений за уровнем воды на измерительной сети Росгидромета, рассчитанных значениях притока воды в водохранилище, а также метеорологического прогноза среднесуточной температуры и суточной суммы осадков в точках с координатами метеорологических станций (см. табл. 3). В настоящий момент используются данные четырех систем метеорологического прогнозирования: COSMO-Ru (Росгидромет), NCEP (Национальная служба погоды США), UKMO (Метеорологическая служба Великобритании) и JMA (Метеорологическое агентство Японии). Заблаговременность оперативных прогнозов притока воды в водохранилище Зейской ГЭС ограничена заблаговременностью метеорологических прогнозов и составляет 2 суток. Выпуск прогнозов осуществляется в 7.30 ч ВСВ (14.30 по Хабаровскому времени).

Качество оперативных прогнозов проверено за теплый период 2014 г. (с 15 июня по 31 сентября). Как видно из табл. 5, методика прогнозов притока воды показала хороший результат со всеми прогностическими метеорологическими данными, используемыми в качестве входной информации на период заблаговременности прогноза. Данные рис. 6 демонстрируют хорошую сходимость расчетного (по гидрометрическому методу) и прогностических гидрографов притока воды в Зейское водохранилище с заблаговременностью 1 сутки. Отдельно оценка точности прогноза

осадков и температур воздуха не проводилась, однако общая удовлетворительная точность методики краткосрочных прогнозов притока воды в водохранилище может свидетельствовать об удовлетворительном качестве метеорологических прогнозов в данном районе.

Таблица 5

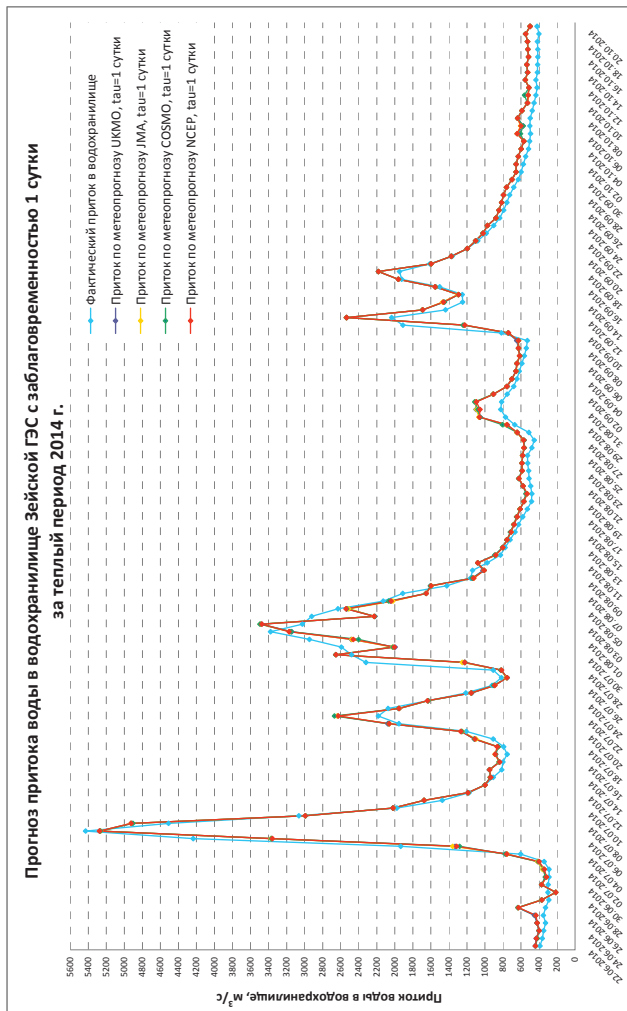
**Показатели качества оперативных прогнозов притока воды  
в водохранилище Зейской ГЭС за период  
15 июня – 31 сентября 2014 г.**

	$\Delta t$ , сут	$S$ , м <sup>3</sup> /с	$\sigma_{\Delta}$ , м <sup>3</sup> /с	$S/\sigma_{\Delta}$
COSMO-Ru	1	227	401	0,57
	2	404	714	0,56
	3	514	936	0,55
NCEP	1	224	401	0,56
	2	387	714	0,54
	3	479	936	0,51
UKMO	1	225	401	0,56
	2	398	714	0,56
	3	500	936	0,53
JMA	1	227	401	0,57
	2	394	714	0,55
	3	486	936	0,52

Примечание:  $\Delta t$  – заблаговременность прогноза, сут.;  $S$  – ошибка прогноза притока, м<sup>3</sup>/с;  $\sigma_{\Delta}$  – стандартное отклонение притока воды за период заблаговременности  $\Delta t$ , м<sup>3</sup>/с;  $S/\sigma_{\Delta}$  – критерий качества методики прогнозов.

### Представление выходной продукции

Визуализация и доведение до потребителей расчетов и прогнозов суточного притока воды в водохранилище Зейской ГЭС выполнено с помощью системы ГИС «Амур», разработанной с применением Веб-ГИС-технологий [7]. В режиме реального времени пользователи прогнозов с помощью сети Интернет имеют доступ к прогностической и фактической гидрологической информации о характеристиках водохранилища и Зейской ГЭС (рис. 7). Автоматизация методик выполнена по принципу, изложенному в [1].



**Рис. 6. Расчетный (линия голубого цвета) и прогностические (заблаговременность – 1 сутки) гидрографы притока воды в водохранилище Зейской ГЭС.**

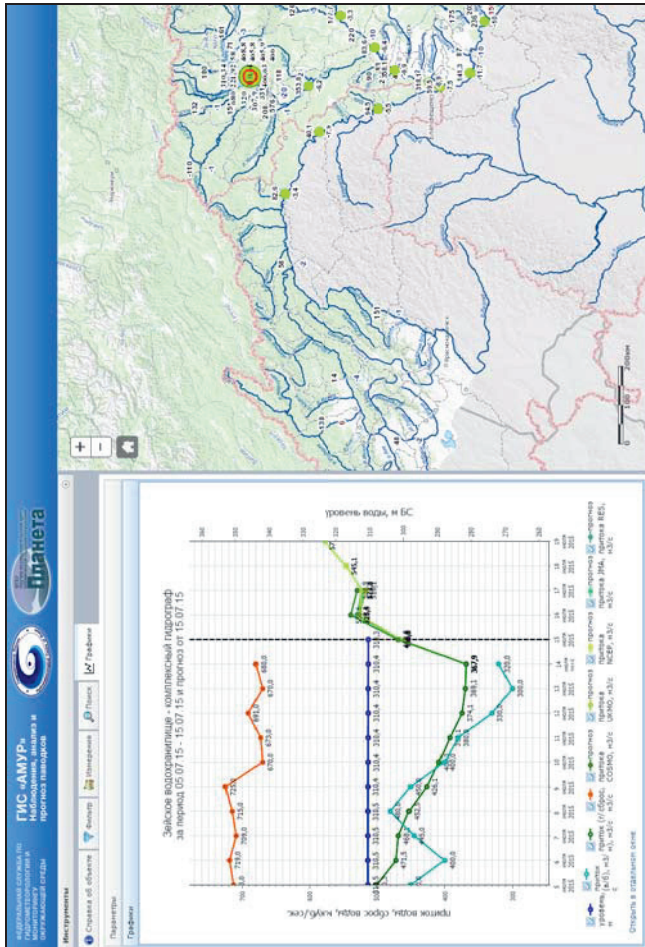


Рис. 7. Представление расчетов и прогнозов притока воды в Зейское водохранилище с помощью Web-GIS-технологий в сети Интернет в рамках системы ГИС «Амур» [7].

На рис. 7 слева можно увидеть комплексный гидрограф притока воды в водохранилище Зейской ГЭС (расчет – линия зеленого цвета слева от вертикальной пунктирной линии, а также прогноз – линии справа от вертикальной пунктирной линии). Также на графике представлен временной ход других характеристик водохранилища – уровня воды в верхнем бьефе (линия синего цвета) и сброса воды из гидроузла (линия красного цвета). На карте в правой части рис. 7 схематично представлено водохранилище, гидрографическая сеть, а также прогностические и расчетных характеристики в цифровом виде. Данный вид представления и доведения до пользователей прогностической и информационно-аналитической продукции является одним из наиболее эффективных. Доступ к оперативным прогнозам может быть получен по адресу [www.hydro.meteoinfo.ru](http://www.hydro.meteoinfo.ru).

### **Заключение**

В результате выполненной работы была создана оперативная система расчета и прогноза суточного притока воды в водохранилище Зейской ГЭС с заблаговременностью до 7 суток. Система работает в автоматизированном режиме – выпуск прогностической и информационно-аналитической продукции осуществляется ежедневно (3.30 и 7.30 ч ВСВ). В настоящий момент ведутся работы по внедрению системы в банк задач АСООИ Гидрометцентра России. Выходная продукция доступна пользователям в режиме реального времени с помощью интернет-технологий ([www.hydro.meteoinfo.ru](http://www.hydro.meteoinfo.ru)), а также производится запись результатов расчета и прогноза в оперативную базу данных Гидрометцентра России.

Проведенные испытания методик расчета и прогноза в оперативном режиме показали их эффективность. Дальнейшее усовершенствование методики выпуска прогнозов притока связано с разработкой алгоритма усвоения ошибок прогнозов на предыдущих шагах по времени при использовании различных метеорологических входов, а также с использованием методов ансамблевого прогнозирования.

Работа проведена в рамках ФЦП Росгидромета «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 гг.».

### Список использованных источников

1. *Бориц С.В., Симонов Ю.А.* Оперативная система краткосрочных гидрологических прогнозов расхода воды на реках бассейна Кубани // Труды Гидрометцентра России. – 2013. – Вып. 349. – С. 63–87.

2. *Бураков Д.А., Гордеев И.Н., Ромасько В.Ю.* Использование спутниковой информации для оценки динамики снегового покрытия в гидролого-математической модели стока весеннего половодья на примере бассейна Саяно-Шушенской ГЭС // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Том 7, № 2. – С. 113–121.

3. *Бураков Д.А.* Кривые добегания и расчет гидрографа весеннего половодья. – Томск: Томский госуниверситет, 1978. – 129 с.

4. *Бураков Д.А., Мельникова О.В.* Аппроксимация кривых добегания при отрицательной асимметрии с использованием зеркального преобразования гамма-распределения // Метеорология и гидрология. – 2000 – № 2. – С. 75–87

5. *Нежиховский Р.А.* Гидрологические расчеты и прогнозы при эксплуатации водохранилищ и озер. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 295 с.

6. *Попов Е.Г.* Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. – М.: Гидрометеиздат, 1963. – 256 с.

7. *Фролов А.В., Асмус В.В., Бориц С.В., Вильфанд Р.М., Жабина И.И., Затыгалова В.В., Кровотынцева В.А., Кудрявцева О.И., Леонтьева Е.А., Симонов Ю.А., Степанов Ю.А.* «ГИС Амур»: система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях // Метеорология и гидрология. – 2016 – №3. – С. 5–21

*Поступила в редакцию 26.11.2016 г.*