

РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПАВОДОЧНЫХ ВОЛН В БАССЕЙНЕ РЕКИ АМУР

© 2017 г. И.О. Неров¹, А.Н. Бугаец²

¹ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Дальневосточный филиал, г. Владивосток, Россия.

²ФГБУН «Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук», г. Владивосток, Россия.

Ключевые слова: бассейн р. Амур, гидродинамическая модель, паводок, прогноз, регулирование, наводнение, моделирование, Зейская ГЭС.



И.О. Неров



А.Н. Бугаец

Прошедшее в 2013 г. на Амуре катастрофическое наводнение выявило необходимость поиска новых решений по предупреждению и минимизации негативных последствий при прохождении паводков. Одним из таких направлений является разработка методики установления сбросного гидрографа Бурейского, Нижне-Бурейского и Зейского водохранилищ, асинхронного с прогнозным гидрографом прохождения паводочной волны на подверженных риску наводнений участках Среднего и Нижнего Амура на основе расчета трансформации паводочной волны.

Представлены результаты численных экспериментов по моделированию трансформации стока р. Амур с помощью гидродинамической модели, разработанной Дальневосточным филиалом ФГБУ РосНИИВХ на основе DHI-MIKE11, для Среднего и Нижнего Амура в целях информационно-аналитического обеспечения деятельности Амурского БВУ по установлению режимов пропусков паводков водохранилищами. В результате верификации гидродинамической модели за период 2016–2017 гг. в целом получены удовлетворительные оценки критериев качества моделирования. На основе анализа результатов моделирования сформированы требования к граничным условиям, а также определен круг практических задач, решение которых необходимо для успешного внедрения методов гидродинамического моделирования в оперативную практику регулирования паводков в бассейне р. Амур: в т. ч. обеспечение актуальности морфометрических и гидравлических характеристик русел и пойм; использование расчетных данных современных прогнозных гидрологических моделей формирования стока; автоматизация сценарных расчетов на основе интеграции с информационной системой государственного гидрологического мониторинга ФГБУ «Дальневосточное УГМС».

Бассейн р. Амур является одним из самых паводкоопасных районов Российской Федерации. После катастрофического паводка 2013 г. различными авторскими коллективами был выполнен ряд работ, направленных на изучение механизмов формирования паводочного стока на основе гидрологических моделей ECOMAG (ECological Model for Applied Geophysics) [1–3] и SWAT 2012 («Soil and Water Assessment Tool») [4]. Разработаны новые методики краткосрочных гидрологических прогнозов заблаговременностью 1–7 сут: притока воды к Бурейскому [5] и Зейскому водохранилищу [6], геоинформационная система «Амур» [7]. Специалистами ФГБУН ИВП РАН выполнена оценка изменений русла Амура в результате прохождения экстремального паводка 2013 г., разработана имитационная математическая модель р. Амур с целью подготовки рекомендаций по комплексу защитных и руслоформирующих мероприятий [8].

Численные эксперименты по оценке противопаводкового эффекта действующих водохранилищ в бассейне Среднего Амура выполнялись с использованием моделей ECOMAG и MIKE 11 [3, 4]. В работах [1, 9] с помощью метода трансформации паводочных волн Калинина-Милюкова дана оценка влияния Зейской ГЭС на максимальные расходы р. Амур при прохождении паводка 2013 г. (на участке г. Благовещенск – г. Хабаровск).

При существенном влиянии на уровненный режим р. Амур регулирующего эффекта Бурейского, Нижне-Бурейского и Зейского водохранилищ внедренные в оперативную практику информационно-аналитического обеспечения органов государственной власти расчетные методы для обоснования принятия управленческих решений, выбора оптимальных режимов пропуска паводков водохранилищами с учетом гидрологического состояния участков нижних бьефов водохранилищ в настоящее время отсутствуют [10].

Установление режимов пропуска паводков, специальных попусков, наполнения и сработки Бурейского, Нижне-Бурейского и Зейского водохранилищ является полномочием территориального органа Федерального агентства водных ресурсов [11]. Решения принимаются руководителем Амурского БВУ на основании рекомендаций Межведомственной рабочей группы по регулированию режимов работы Бурейского, Нижне-Бурейского и Зейского водохранилищ (далее – МРГ) [12].

Дальневосточным филиалом ФГБУ РосНИИВХ в рамках государственного задания и соглашения о взаимодействии с Амурским БВУ в 2016 г. начаты работы по адаптации разработанных методик к задачам информационно-аналитического обеспечения деятельности Амурского БВУ по установлению оптимальных режимов пропусков паводков водохранилищами, включая «Гидродинамическую модель распространения паводочной волны в основном русле р. Амур (среднее и нижнее течение)» [8].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Амур – одна из крупнейших трансграничных рек мира, имеет десятый по размеру речной бассейн площадью 1,85 млн км², длина Амура от слияния рек Шилка и Аргунь составляет 2,8 тыс. км. Традиционно Амур разделяют на три основных участка: верхний, от слияния Шилки и Аргуни до устья р. Зея (выше г. Благовещенска); средний – от устья р. Зея до г. Хабаровска; нижний – от г. Хабаровска до впадения реки в Охотское море. Гидрологический режим Амура характеризуется неравномерным сезонным и многолетним стоком, что, в первую очередь, связано с муссонным типом климата. Основной фазой водного режима рек являются дождевые паводки [13].

На российской части бассейна сток р. Амур зарегулирован Зейским, Бурейским и Нижне-Бурейским водохранилищами с общим полезным объемом 42,817 км³ [14 – 16].

Во второй половине XIX–XX веков в бассейне Амура зафиксировано восемь больших наводнений. Наиболее масштабными и разрушительными были наводнения 1872, 1897 и 1959 годов. В июле–сентябре 2013 г. на Амуре произошло сильнейшее катастрофическое наводнение, которое охватило почти весь бассейн реки, включая территорию российского Дальнего Востока и северо-восточных районов КНР. Измеренный специалистами Государственного гидрологического института и Дальневосточного УГМС расход воды при прохождении пика паводка в створе Хабаровска составил 46 000 м³/с. Повторяемость этого события оценивается как один раз в 200–250 лет [17].

Влияние площади бассейна и разнообразие условий формирования стока на водосборе выражаются в существовании нескольких очагов формирования наводнений в среднем и нижнем течении Амура – Верхнеамурский, Зейско-Бурейский, Сунгарийский и Уссурийский. Их доли в стоке Амура крайне динамичны, каждый из них может быть причиной формирования значительного наводнения, однако выдающиеся наводнения на Амуре формируются в результате наложения паводковых волн двух и более очагов [9, 13]. Особенностью катастрофического паводка 2013 г. стала высокая степень синхронности развития и добегания паводочных волн, сформированных в разных областях водосбора Амура.

Кроме вышперечисленных естественных пространственных закономерностей, в формировании наводнений в большей или меньшей степени (в зависимости от режима сброса) участвует и сток с зарегулированной Бурейским, Нижне-Бурейским и Зейским водохранилищами части водосбора р. Амур (наложения паводковых волн, пропускаемых через водохранилища).

В соответствии с действующими правилами использования водных ресурсов водохранилищ многолетнее и внутригодовое перераспределение части стока бассейна р. Амур осуществляется:

- путем полной аккумуляции паводочного стока в первую половину теплого периода и сработкой в осенне-зимний период (общая емкость водохранилищ составляет 26, 113 км³);
- управлением сброса воды в установленных отметках (выше отметки НПУ) общей емкостью 6,98 км³ и сбросными расходами в диапазоне 1900 ÷ 10500 м³/с;
- «неуправляемой» трансформацией паводочных расходов воды за счет емкости форсировки водохранилищ и разницы максимальной пропускной способности водосбросных сооружений гидроузлов и максимальных расходов притока [14–16].

Одной из задач по предупреждению и минимизации негативных последствий при прохождении паводков является разработка методики установления сбросного гидрографа Бурейского, Нижне-Бурейского и Зейского водохранилищ, асинхронного с прогнозным гидрографом прохождения паводочной волны на подверженных риску наводнений участках Среднего и Нижнего Амура на основе расчета трансформации паводочной волны.

Гидродинамическая модель распространения паводочной волны в основном русле р. Амур (среднее и нижнее течение) разработана специалистами Института водных проблем Российской академии наук в рамках научно-исследовательской работы «Оценка изменений русла р. Амур в результате прохождения экстремального паводка 2013 г., разработка и внедрение имитационной математической модели р. Амур с целью подготовки рекомендаций по комплексу защитных и руслоформирующих мероприятий на прибрежной территории Российской Федерации» [7] и предназначена для расчета неустановившегося движения воды в русле Амура на участке от с. Черняево до г. Николаевска-на-Амуре в период прохождения паводков. Гидродинамическая модель введена в постоянную эксплуатацию приказом Амурского БВУ от 29.01.2015 г. № 05-07/17 и передана в Дальневосточный филиал ФГБУ РосНИИВХ для использования в целях информационно-аналитического сопровождения деятельности Амурского БВУ.

Гидродинамическая модель создана на базе программного комплекса DHI MIKE11, разработанного Датским гидравлическим институтом (Danish Hydraulic Institute, DHI). MIKE11 – это инженерный программный пакет одномерного моделирования речных потоков, качества воды и транспорта наносов, управления водными ресурсами и проектирования гидротехнических сооружений. Гидродинамический модуль MIKE11 осуществляет численное интегрирование уравнений неразрывности и сохранения энергии Сен-Венана с использованием неявной конечно-разностной схемы Эббота–Ионеску [18]. Исходными данными для моделирования является информация о морфометрии речных долин и русел, представленная в виде

поперечных профилей. В качестве граничных условий задаются расходы воды на верхней и уровни воды на нижней границе расчетного участка как функции времени. Результатом моделирования является временной ход расходов и уровней воды в расчетных створах.

Участок моделирования (рис. 1.) определен границами р. Амур от с. Черняево (454 км выше г. Благовещенка) до устья р. Амур (г. Николаевск-на-Амуре). В гидродинамической модели учтены притоки Зeya, Бурей, Сунгари, Большая Бира, Усури, Тунгуска, Гур и Амгунь. На рис. 1 приведена расчетная схема участка моделирования р. Амур и основных ее притоков.

Пространственная структура гидродинамической модели реализована на основе стандартной морфометрической и гидрометрической информации. В линейную модель речной сети (основного русла) р. Амур на участке от с. Черняево до г. Николаевска включено 906 точек на 5 участках: р. Амур, протоки Казакевичева, Амурская, Пемзенская, Бешеная, Прямая.

По основному руслу р. Амур описаны формы поперечных сечений: всего в гидродинамическую модель включены 139 поперечных сечений (103 по основному руслу р. Амур, 9 – по Пемзенской протоке, 5 – по протоке Прямая, 14 – по протокам Казакевичева и Амурская; 8 – по протоке Бешеная). Граничными условиями учтен сток с водосбора р. Амур площадью 1,53 млн км², что составляет более 82 % площади бассейна реки.



Рис. 1. Расчетная схема участка моделирования

Таблица 1. Граничные условия ГДМ

Код поста	Название гидрологического поста	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Временной ряд
6010	р. Амур – с. Черняево	2388,00	440 000,00	уровни воды
6295	р. Зея – с. Белогорье	43,00	229 000,00	расходы воды
6473	р. Буряя – с. Малиновка	80,00	67 400,00	расходы воды
08123	р. Сунгари – г. Цзямусы	270,00	528 277,00	расходы воды
5063	р. Большая Бира – г. Биробиджан	125,00	7560,00	расходы воды
5115	р. Уссури – с. Шереметьево	147,00	156 000,00	расходы воды
5347	р. Хор – пгт Хор	26,00	24 500,00	расходы воды
5358	р.Тунгуска – с. Архангеловка	61,00	29 400,00	расходы воды
5733	р. Гур – пос. Снежный	138,00	8060,00	расходы воды
5453	р. Амгунь – с. Гуга	193,00	41 000,00	расходы воды
5805	р. Амур – г. Николаевск	48,00	1 850 000,00	уровни воды

Началом расчетного периода года является 1 июня. Данное ограничение связано с условиями российско-китайской программы обмена гидрологической информацией по водным объектам бассейна р. Амур. Российской стороне предоставляются ежедневные данные по стоку р. Сунгари, которая входят в перечень граничных условий гидродинамической модели. В связи с тем, что в мае происходит заполнение противопаводковых сработанных к началу половодья емкостей водохранилищ, указанное ограничение не влияет на обеспечение расчетной информацией Амурского БВУ.

С целью учета ошибок результатов моделирования, связанных с заданием начальных условий на 1 июня, проведены численные эксперименты по оценке влияния начальных условий на результаты моделирования. Для получения таких оценок (по данным за июнь–сентябрь 2016 г.) выполнены расчеты по гидродинамической модели с заданием начальных условий в трех вариантах:

- а) кривая свободной поверхности на начало расчетного периода соответствует меженному периоду (получена по гидродинамической модели);
- б) кривая свободной поверхности сформирована стандартными средствами задания Initial Conditions в MIKE 11: «Type of condition = hotstart»;
- в) кривая свободной поверхности сформирована по фактическим уровням воды (на 1 июня) на гидрологических постах и расходам воды, полу-

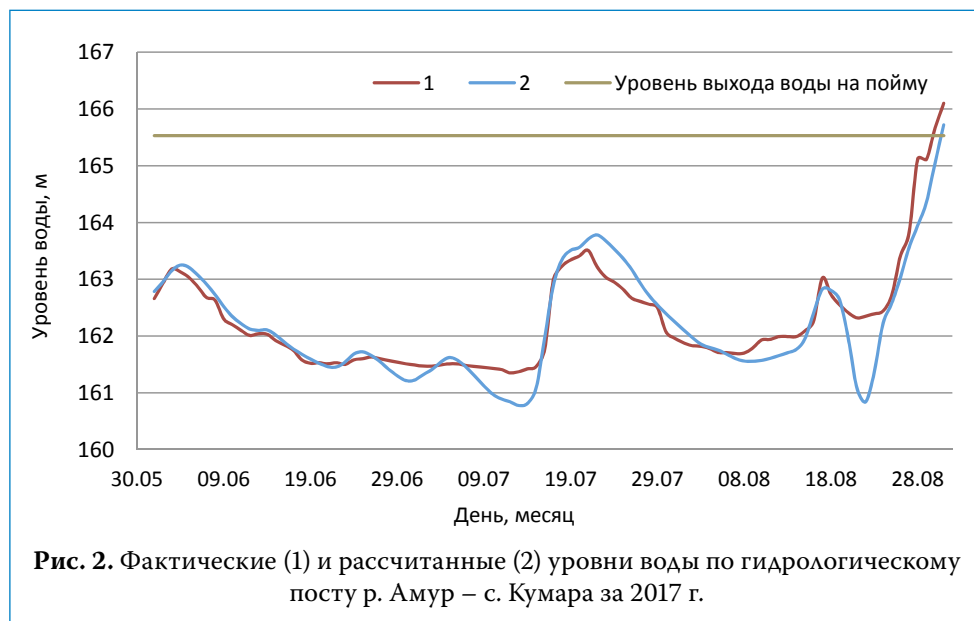
ченным по кривой расходов, рассчитанной по гидродинамической модели (на участках между гидрологических постами принималось линейное изменение уровня воды).

При сопоставлении результатов установлено, что период влияния начальных условий (для различных створов) составляет от 5 сут у г. Благовещенска и до 45 сут – у г. Комсомольска-на-Амуре.

На период опытной эксплуатации гидродинамической модели в оперативном режиме Амурским БУ была организована ежедневная передача в Дальневосточный филиал ФГБУ РосНИИВХ данных Росгидромета о приточности на верхних (в/п Черняево) и боковых границах (по основным притокам р. Амур). Данные о граничных условиях вносились в соответствующие файлы с помощью редактора DHI MIKE11, после чего выполнены моделирование и оценка сходимости результатов моделирования с наблюдаемыми значениями. Результаты моделирования и оценки в виде таблиц и графиков представлены в Амурское БУ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Верификация и корректировка результатов гидродинамического моделирования выполнена по 10 гидрологическим постам р. Амур на основе данных наблюдений за уровнями воды летне-осенних периодов 2016–2017 гг. Пример результатов расчета за 2017 г. для поста р. Амур – с. Кумара представлен на рис. 2.



Согласно принятой в Росгидромете практике, для оценки эффективности моделирования используется отношение среднеквадратической погрешности прогноза S и величины среднеквадратического отклонения гидрологической величины x от нормы σ_x или на протяжении периода заблаговременности прогноза σ_Δ (индекс Δ обозначает период заблаговременности прогноза) в зависимости от того, какая из этих величин меньше [19]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (x_t - y_t)^2}{n - m}} \quad (1)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

$$\sigma_\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (\Delta_t - \bar{\Delta})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

где x – измеренная гидрологическая величина (уровень воды);
 y – прогнозное значение x (в каждый момент времени t величине x_t соответствует величина y_t);
 \bar{x} – математическое ожидание x ;
 n – длина ряда;
 m – число параметров, входящих в прогнозную методику;
 Δ_t – разность между конечным x_t и начальным $x_{t-\Delta}$ значениями явления за период заблаговременности прогноза;
 $\bar{\Delta}$ – норма этой разности.

Методики прогнозирования могут считаться удовлетворительными при S/σ_x (S/σ_Δ) < 0,8 и хорошими при S/σ_x (S/σ_Δ) < 0,5. Кроме отношения S/σ_x и S/σ_Δ , для оценки результатов были использованы коэффициент Нэша–Сэтклифа NSE [20], коэффициент детерминации R^2 , величина смещения $BIAS$, оправдываемость прогноза P (за период заблаговременности прогноза принято среднее время добегания от с. Черняево (р. Амур) до расчетного створа).

$$R^2 = - \frac{\left[\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})(y_t - \bar{y}) \right]^2}{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2} \quad (4)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (x_t - y_t)^2}{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2} \quad (5)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{t=1}^n (x_t - y_t)}{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})} \quad (6)$$

где \bar{y} – математическое ожидание y .

$$P = \frac{m}{n} 100 \% \quad (7)$$

где m – число случаев, в которых ошибки проверочных прогнозов были меньше допустимой.

При расчете P % допустимая погрешность прогноза принимается как наименьшее из $0,674 \sigma_x$ и $0,674 \sigma_{\Delta}$. Категория качества методики является «хорошей» при $P \geq 82$ % и «удовлетворительной» – при 60 % $< P < 81$ %.

Значения коэффициентов детерминации и Нэша–Сэтклифа в интервалах $0,65 < R^2 < 0,75$, $0,5 < NSE < 0,65$ указывают на удовлетворительные результаты; при $NSE > 0,65$, $R^2 > 0,75$ качество моделирования считается хорошим.

При сравнении расчетных и наблюдаемых гидрографов уровней воды 2016 г. для всех расчетных постов (кроме р. Амур – с. Кумара и р. Амур, протока Поярковская – с. Поярково) выявлено систематическое отклонение расчетных гидрографов (пример для гидрологического поста р. Амур – с. Ленинск представлен на рис. 3) относительно наблюдаемых значений. В связи с этим, в 2017 г. для расчетных данных гидродинамической модели выполнялась статистическая корректировка на разность среднеарифметического значения для расчетного и наблюдаемого гидрографов уровней 2016 г.

Оценки результатов моделирования (табл. 2) рассчитаны за периоды, исключаяющие влияние начальных условий на результаты моделирования. Значения показателей с учетом статистической корректировки (табл. 2) в целом указывают на удовлетворительную сходимость результатов моделирования с фактическими данными в большинстве створов, но имеют недостаточную оправдываемость для использования гидродинамической модели в практике гидрометеорологического обеспечения.

В первую очередь это связано с низкой водностью в летне-осенние периоды 2016–2017 гг.: единственный паводок с уровнями выше отметок поймы прошел на р. Амур в июле-августе 2016 г., в то время как гидродинамическая модель предназначалась для расчетов в периоды прохождения высоких па-



водков. Необходимость увеличения диапазона применимости данной модели в сторону малых расходов связана с задачами оценки и установления режимов сброса воды с водохранилищ. «Управляемые» сбросы с Зейско-го и Бурейского водохранилищ (Зейско-Буреинский очаг формирования наводнений), суммарные максимальные значения которых составляют 10 500 м³/с, могут быть причиной формирования значительного наводнения в среднем и нижнем течении Амура.

Среди других объективных причин недостаточной оправдываемости гидродинамического моделирования следует отметить тот факт, что с момента разработки данной модели на отдельных участках русла и поймы р. Амур прошли русловые деформации, намыло береговые валы [21], были построены и реконструированы гидротехнические сооружения, оказывающие влияние на гидравлический режим реки, в т. ч. в районах Хабаровска, Благовещенска, Комсомольска и Хайхэ; селах Орловка, Ленинск и др. Кроме этого, в связи с недостаточной оснащенностью бассейна р. Амур сетью гидрологических постов государственной наблюдательной сети и ограниченностью российско-китайской программы обмена гидрологической информацией на участке моделирования (среднем и нижнем течении Амура) в гидродинамической модели не учтен сток с 18 % площади водосбора. Таким образом, для увеличения оправдываемости и эффективного использования модели, необходимо решить ряд задач:

Таблица 2. Показатели эффективности моделирования по гидродинамической модели за 2017 г.

Код поста	Название гидрологического поста	$S/\sigma_x (S/\sigma_\Delta)$	NSE	R^2	$BIAS, \%$	$P, \%$
6016	р. Амур – с. Кумара	0,65	0,84	0,86	0	82
6022	р. Амур – г. Благовещенск	0,82	0,45	0,92	0	54
6024	р. Амур – с. Константиновка	0,64	0,60	0,95	0	71
6026	р.Амур, протока Поярковская – с. Поярково	0,44	0,81	0,93	0	96
6030	р. Амур – с. Пашково	0,63	0,60	0,87	0	61
5004	р. Амур – с. Ленинск	0,39	0,85	0,90	0	99
5012	р. Амур – г. Хабаровск	0,74	0,46	0,66	-1	55
5016	р. Амур – с. Елабуга	0,61	0,64	0,65	0	76
5019	р. Амур – с. Троицкое	0,66	0,58	0,74	-1	59
5024	р. Амур – г. Комсомольск	0,66	0,57	0,81	-2	55

– актуализации в гидродинамической модели морфометрических и гидравлических параметров рек и гидротехнических сооружений в соответствии с их современным состоянием, по актуальным топографическим материалам и данным спутниковой съемки, проведением полевых гидрологических изысканий, включая промерные работы в руслах рек Амур, Зея и Уссури;

– включения в гидродинамическую модель участков русел притоков р. Амур, входящих в граничные условия модели;

– включения в гидродинамическую модель дополнительных граничных условий, в т. ч. расчетных данных современных прогностических моделей формирования стока и методик прогноза расходов воды рек бассейна р. Амур большой заблаговременности;

– калибровки и верификации гидродинамической модели с новыми граничными условиями;

– разработки технологии усвоения данных наблюдений за расходами и уровнями воды;

– адаптации гидродинамической модели к задачам регулирования режимов работы водохранилищ (сценарные расчеты режимов пропуска паводков водохранилищами в целях безаварийного пропуска паводков с минимальным негативным воздействием вод);

– автоматизации в гидродинамической модели процессов ввода ежедневных (и учащенных) исходных данных посредством интеграции с информационным обеспечением гидрологического мониторинга ФГБУ «Дальневосточное УГМС» [22].

Данный перечень включает основные направления актуализации морфометрических и гидравлических параметров гидродинамической модели, а также задачи адаптации модели к ее использованию в системе оперативного информационно-аналитического обеспечения деятельности Амурского БВУ по установлению оптимальных режимов пропуска паводков Бурейского, Нижне-Бурейского и Зейского водохранилищ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате численных экспериментов по верификации гидродинамической модели за период 2016–2017 гг. получены удовлетворительные оценки качества моделирования. Оправдываемость рассчитанных по гидродинамической модели значений уровней воды (до отметок поймы), оцененная в соответствии с принятой в Росгидромете методикой, для некоторых расчетных створов оказалась недостаточной для ее использования в оперативной практике.

В связи с этим, в ФГБУ РосНИИВХ на 2018–2020 гг. разработана программа по совершенствованию гидродинамической модели и внедрению постоянно действующей оперативной автоматизированной прогнозной модели распространения паводочной волны в бассейне Амура, обеспечивающей решение задачи установления оптимальных режимов пропуска паводков Бурейским, Нижне-Бурейским и Зейским водохранилищами. Успешность решения поставленных задач находится в тесной зависимости от разработки и внедрения в оперативную практику гидрологического прогнозирования Росгидромета среднесрочных и долгосрочных методик прогнозирования расходов воды рек бассейна Среднего и Нижнего Амура.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мотовилов Ю.Г., Данилов-Данильян В.И., Дод Е.В., Калугин А.С. Оценка противопаводкового эффекта действующих и планируемых водохранилищ в бассейне Среднего Амура на основе физико-математических гидрологических моделей // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 3. С.1–15.
2. Бугаец А.Н., Мотовилов Ю.Г., Беликов В.В., Гельфан А.Н., Гончуков Л.В., Калугин А.С., Крыленко И.Н., Морейдо В.М., Норин С.В., Румянцев А.Б., Сазонов А.А. Построение интегрированной системы гидрологического моделирования с применением стандарта OpenMI для задач управления риском наводнений (на примере Среднего Амура) // Сб. тр. всеросс. научн. конф. «Научное обеспечение реализации Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.». Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. Т. 2. С. 12–20.

3. *Калугин А.С.* Модель формирования стока реки Амур и ее применение для оценки возможных изменений водного режима: автореф. дисс. ... канд. геогр. наук, 2016. 185 с.
4. *Bugaets A.N., Gartsman B.I., Gonchukov L.V., Sokolov O.V., Lee K.T., Motovilov Yu.G., Belikov V.V., Moreido V.M., Kalugin A.S., Aleksyuk A.I., Krylenko I.N., Rumyantsev A.B.* Regional hydrological model - the infrastructure and framework for hydrological prediction and forecasting // Международная научн.-практ. конф. «Водный форум БРИКС». Москва, 2016. Режим доступа: <http://www.hse.ru/mirror/pubs/share/194915736>.
5. *Мотовилов Ю.Г., Балыбердин В.В., Гарцман Б.И., Гельфан А.Н., Морейдо В.М., Соколов О.В.* Краткосрочный прогноз притока воды в Бурейское водохранилище на основе модели ЕСОМАГ с использованием метеорологических прогнозов // Водное хозяйство России. 2017. № 1. С. 78–102.
6. *Борищ С.В., Бураков Д.А., Симонов Ю.А.* Методика оперативного расчета и прогноза суточного притока воды в водохранилище Зейской ГЭС // Труды ГУ ГМЦ РФ. Вып. 359. 2016. С. 106–127.
7. *Фролов А.В., Асмус В.В., Борищ С.В., Вильфанд Р.М., Жабина И.И., Затягалова В.В., Кровотынцев 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.
8. Отчет о выполненной работе по теме И-13-16: «Оценка изменений русла реки Амур в результате прохождения экстремального паводка 2013 года, разработка и внедрение имитационной математической модели р. Амур с целью подготовки рекомендаций по комплексу защитных и руслоформирующих мероприятий на прибрежной территории Российской Федерации». Москва. ФГБУН ИВП РАН, 2014.
9. *Болгов М.В., Алексеевский Н.И., Гарцман Б.И., Георгиевский В.Ю., Дугина И.О., Ким В.И., Махинов А.Н., Шалыгин А.А.* Экстремальное наводнение в бассейне Амура в 2013 году: анализ формирования, оценки и рекомендации // География и природные ресурсы. 2015. № 3. С. 17–26.
10. *Макаров А.В., Неров И.О.* К вопросу об информационно-аналитическом сопровождении деятельности межведомственной рабочей группы по регулированию режимов работы Бурейского, Нижне-Бурейского и Зейского водохранилищ при прохождении паводков в бассейне реки Амур // Сб. материалов XIV междунар. научн.-практ. симпозиума «Чистая вода России». Екатеринбург, 2017. С. 68 – 72.
11. Приказ Федерального агентства водных ресурсов от 11.03.2014 № 66 «Об утверждении Положений о территориальных органах Федерального агентства водных ресурсов».
12. Приказ Федерального агентства водных ресурсов от 28.11.2016 № 245 «О Межведомственной рабочей группе по регулированию режимов работы Бурейского, Нижне-Бурейского и Зейского водохранилищ».
13. Ресурсы поверхностных вод Верхний и Средний Амур. Л.: Гидрометеоздат, 1966. Т. 18. Вып. 1. 782 с.

14. Временные правил использования водных ресурсов Бурейского водохранилища на р. Бурее на период май 2009 – апрель 2010 гг. ОАО «Ленгидропроект», Санкт-Петербург, 2009.
15. Приказ Федерального агентства водных ресурсов от 28.12.2016 № 290 «Об утверждении Временных правил использования водных ресурсов Нижне-Бурейского водохранилища на р. Бурее».
16. Основные правила использования водных ресурсов Зейского водохранилища на р. Зее. Мин-во мелиорации и водного хозяйства РСФСР. М., 1984.
17. Фролов А.В., Георгиевский В.Ю. Экстремальный паводок 2013 г. в бассейне р. Амур // Сб. докл. «Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации». М.: Росгидромет, 2014. С. 5–39.
18. Компьютерное моделирование систем рек и каналов Mike11. М.: Научная консалтинговая фирма «Волга», 2013.
19. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Служба гидрологических прогнозов. Ч. 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1952.
20. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles // J. Hydrol., 1970. Vol. 10. No 3. P. 282–290.
21. Махинов А.Н. Водный режим поймы р. Амур и особенности пойменного осадконакопления во время экстремального наводнения 2013 г. // Метеорология и гидрология. 2017. №3. С. 87–92.
22. Бугаец А.Н., Гончуков А.В., Соколов О.В., Гарцман Б.И., Красношеев С.М. Автоматизированная информационная система гидрологического мониторинга и управления данными // Метеорология и гидрология. 2017. № 3. С. 103–113.

Сведения об авторах:

Неров Игорь Олегович, заведующий отделом моделирования гидрологических процессов, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Дальневосточный филиал, Россия, 690014, Владивосток, пр. Красного Знамени, 66, а/я 153; e-mail: inerov@bk.ru

Бугаец Андрей Николаевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория гидрологии и климатологии, ФГБУН «Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук», Россия, 690041, Владивосток, ул. Радио 7; e-mail: andreybugaets@ya.ru