

Оценка влияния противопаводковых сооружений на уровень воды в нижнем течении речной системы Сайгон – Донгнай

Ирина Михайловна Маркова, Фан Хань Хань

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Хошимин — крупнейший город Вьетнама, расположенный в нижнем течении системы рек Сайгон – Донгнай, сталкивается со все более серьезными наводнениями вследствие изменения стока и уровня воды в реке. Приводятся результаты исследования по оценке влияния гидротехнических сооружений, расположенных в верхнем течении, на уровень воды в нижнем течении р. Сайгон – Донгнай.

Материалы и методы. Для оценки влияния вышерасположенных водохранилищ и противопаводковых сооружений на уровень воды в нижнем течении р. Сайгон – Донгнай собраны гидрологические данные речной сети и на основе цифровой модели рельефа разработана гидравлическая модель с применением программного комплекса Mike 11, Mike 21 и Mike Flood.

Результаты. Уровень воды на р. Сайгон от верхнего течения до измерительной станции Тху Зау Мот напрямую зависит от водохранилища Зау Тиенг, а водохранилище Чи Ан напрямую влияет на уровень воды на участке реки за плотиной Чи Ан до участка р. Донгнай в районе Там Ан – Лонг Фуок.

Выводы. На участках рек Сайгон и Донгнай, менее подверженных влиянию двух вышележащих водохранилищ, необходимо разработать превентивные меры для поступления достаточных объемов пресной воды, обеспечивающих потребности населения и отраслей экономики. В районах, подверженных затоплению и подтоплению в результате работы противопаводковых шлюзов, также необходимо провести реконструкцию гидротехнических сооружений (поднять отметки фундаментов, расширить системы дренажа, построить резервуары для сбора паводковой воды и др.).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидротехнические противопаводковые сооружения, нижнее течение реки Сайгон – Донгнай, водохранилище Зау Тиенг, водохранилище Чи Ан

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Маркова И.М., Фан Хань Хань. Оценка влияния противопаводковых сооружений на уровень воды в нижнем течении речной системы Сайгон – Донгнай // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 9. С. 1408–1421. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.9.1408-1421

Автор, ответственный за переписку: Ирина Михайловна Маркова, markova@mgsu.ru.

Influence of flood control structures on the water level in the downstream of the Saigon – Dong Nai river system

Irina M. Markova, Phan Khanh Khanh

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Ho Chi Minh City, the largest city in Vietnam, located in the lower reaches of the Saigon – Dong Nai river system, is facing increasingly severe flooding due to changes in river flow and water levels. This article presents the results of a study to assess the impact of hydraulic structures located in the upper reaches on the water level in the lower reaches of the SG – DN river.

Materials and methods. To assess the impact of upstream reservoirs and flood control structures on the water level in the lower reaches of the SG – DN river, hydrological data of the river network were collected and a hydraulic model was developed based on a digital elevation model (DEM) using the software package Mike 11, Mike 21 and Mike Flood.

Results. The water level of the Saigon River from the upper reaches to the Thu Dau Mot measuring station directly depends on the Dau Tieng reservoir, and the Tri An reservoir directly affects the water level in the river section from behind the Tri An dam to the Dong Nai section in the Tam An – Long Phuoc area.

Conclusions. In the sections of the Saigon and Dong Nai Rivers less affected by the two upstream reservoirs, it is necessary to develop preventive measures to supply sufficient fresh water to meet the needs of the population and industries. In areas prone to flooding and underflooding as a result of the operation of floodgates, it is also necessary to reconstruct hydraulic structures (raise foundation level, expand drainage systems, build reservoirs to collect flood water etc.).

KEYWORDS: hydraulic flood protection structures, downstream Saigon – Dong Nai, Dau Tieng Reservoir, Tri An Reservoir

FOR CITATION: Markova I.M., Phan Khanh Khanh. Influence of flood control structures on the water level in the downstream of the Saigon – Dong Nai river system. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(9):1408-1421. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.9.1408-1421 (rus.).

Corresponding author: Irina M. Markova, markova@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы во многих странах мира последствия наводнений становятся все более серьезными, затрагивая не только экономику, но и вызывая миллионы жертв, разрушая дома, сады [1–4]. Ущерб от наводнений оказывается более серьезным в прибрежных городах в развивающихся странах, где меры по борьбе с наводнениями не очень эффективны [1, 4, 5].

Район в нижнем течении рек Сайгон – Донгнай, где расположен г. Хошимин, является крупнейшим финансово-экономическим центром Вьетнама и может быть рассмотрен как типичный пример прибрежного города в Юго-Восточной Азии, столкнувшегося с проблемами, связанными с изменением климата, повышением уровня моря из-за относительно небольшой высоты над его уровнем, быстрым темпом урбанизации, сложной системой каналов и отсутствием мер по борьбе с приливами. В 2005 г. Хошимин вошел в десятку городов мира с наибольшим количеством людей, пострадавших от наводнения [3–6]. А к 2070 г., по прогнозам специалистов, Хошимин войдет в пятерку лучших в мире¹.

Для решения проблемы наводнений в Хошимине в настоящее время осуществляется строительство противопаводковых гидротехнических сооружений согласно государственному Плану ирригации для предотвращения наводнений и борьбы с ними в районе Хошимина в соответствии с Постановлением № 1547/QĐ-TTg. Сооружения инженерной защиты в основном предназначены для борьбы с наводнениями в сезон дождей, а также приливов — в сухой сезон, когда максимальный уровень приливов превышает 1,2 м. Эти противопаводковые сооружения выполнены в виде шлюзов с затворами, которые открываются и закрываются в зависимости от уровня воды в реке. Водохранилища Зау Тиенг и Чи Ан, расположенные в верхнем течении р. Сайгон – Донгнай, также играют определенную роль в регулировании стока вниз по течению.

Изучению режима стока и наносов в нижнем течении р. Сайгон – Донгнай посвящены работы [7–10]. В данных трудах отмечается, что этот район очень чувствителен к изменению климата, повышению уровня моря и землепользованию. Под влиянием указанных факторов меняется режим течения и наносов. В частности, уровень воды на измерительных станциях будет повышаться по прогнозным

сценариям, в ближайшие годы увеличится общее количество аллювия и наносов всего бассейна.

В исследованиях [11–13] показано, что при высоте прилива более 1,2 м приливные шлюзы будут закрыты, что окажет существенное влияние на уровень воды внешней территории противопаводковых сооружений. Проникновение соленой воды создает трудности для аквакультуры, сельского хозяйства и получения пресной воды для повседневной жизни людей.

Очевидно, что эти исследования сосредоточены только на оценке влияния изменения климата, подъема уровня моря и землепользования на режим стока, аллювиальный режим, качество воды и процесс инфильтрации морских вод и так далее в бассейне р. Сайгон – Донгнай. Необходимо отметить, что не изучалась оценка воздействия противопаводковых сооружений и водохранилищ выше по течению на уровень воды в нижнем течении реки р. Сайгон – Донгнай.

В настоящей работе оценивается влияние противопаводковых работ и водохранилищ на уровень воды в нижнем течении р. Сайгон – Донгнай. Результаты исследования имеют практическое значение для оказания помощи градостроительным и управляющим органам в выработке рекомендаций и разработке сценариев предотвращения наводнений с целью минимизации воздействия стихийных бедствий на жизнь людей и жизнедеятельность окружающей среды в нижнем течении р. Сайгон – Донгнай. Важно определить влияние двух водохранилищ вверх по течению реки, чтобы помочь людям по обеим сторонам реки активно использовать воду для выращивания риса, фруктовых деревьев и отбора водных видов, пригодных для выращивания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использовались программы Mike 11, Mike 21 и Mike Flood для оценки влияния водохранилищ и противопаводковых сооружений на уровень воды в нижнем течении р. Сайгон – Донгнай. Основные параметры этих конструкций представлены ниже.

Областью исследования является нижнее течение р. Сайгон – Донгнай. Этот район примыкает к дельте Меконга на юго-западе, Восточному морю на юге и юго-востоке, к югу от центральных провинций Вьетнама на северо-востоке (рис. 1). В районе имеется переплетенная система рек и каналов, на которые влияет тропический муссонный климат и уровень приливов в Восточном море.

Расположенное в верхнем течении р. Сайгон водохранилище Зау Тиенг используется с 1985 г. для обеспечения водой сельскохозяйственного про-

¹ Всемирный банк. Климатические риски и адаптация в прибрежных мегаполисах Азии // Сводный отчет. 2016.

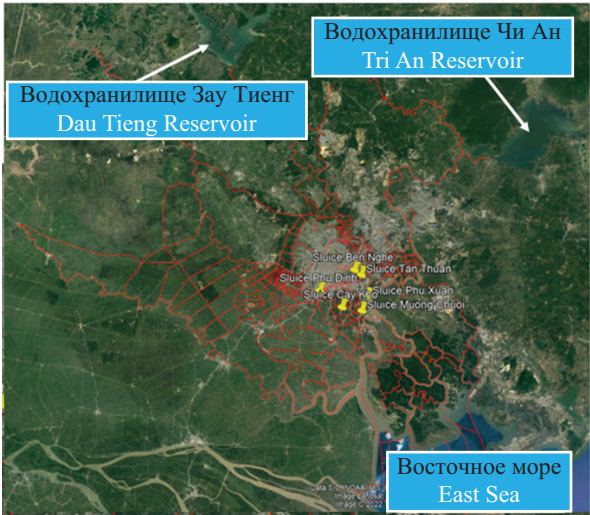


Рис. 1. Нижнее течение р. Сайгон – Донгнай

Fig. 1. The lower reaches of the Saigon – Dong Nai river

изводства и повседневной жизни в провинциях Тай Нинь, Бинь Зьонг, Лонг Ан и Хошимин, уменьшения наводнений. Это крупнейшее искусственное водохранилище во Вьетнаме объемом $1580 \times 10^9 \text{ м}^3$, проектным расходом $2800 \text{ м}^3/\text{с}^2$. Строительство водохранилища Чи Ан было начато в 1984 г. и завер-

² Решение 2597/QĐ-BNN-TCTL. Порядок эксплуатации водохранилища Зау Тиенг. Министерство сельского хозяйства и развития села. Ханой, 23 октября 2012 г.

шено в начале 1987 г. Это искусственное озеро, расположенное на р. Донгнай, емкостью $2765 \times 10^6 \text{ м}^3$, с расчетным расходом $19\,580 \text{ м}^3/\text{с}$ является водохранилищем ГЭС Чи Ан мощностью 400 МВт с годовой выработкой электроэнергии 1,7 млрд кВт·ч³.

28 октября 2008 г. премьер-министр утвердил План ирригации для предотвращения наводнений и борьбы с ними в районе Хошимина в соответствии с Постановлением № 1547/QĐ-ТТг, согласно документу, в городе будут построены противопаводковые сооружения. Их расположение показано на рис. 2.

Фактически только в середине мая 2016 г. эти противопаводковые работы были начаты и по состоянию на май 2021 г. построено около 90 % приливных шлюзов. Технические параметры этих сооружений представлены в табл. 1.

Mike 11 — универсальный инженерный инструмент для одномерного моделирования гидродинамических условий в реках⁴. Mike 11 HD решает уравнения Сен-Венана для определения гидродинамического состояния речных сетей. Гидродинамическая (HD) модель способна моделировать одномерный нестационарный поток в сети рек с использованием гидродинамического волнового под-

³ Решение 2700/QĐ-ВСТ. Порядок эксплуатации водохранилища гидроэлектростанции Чи Ан. Минпромторг. Ханой, 2 августа 2018 г.

⁴ DHI-MIKE 11. Система моделирования рек и каналов // Справочное руководство. 2007.

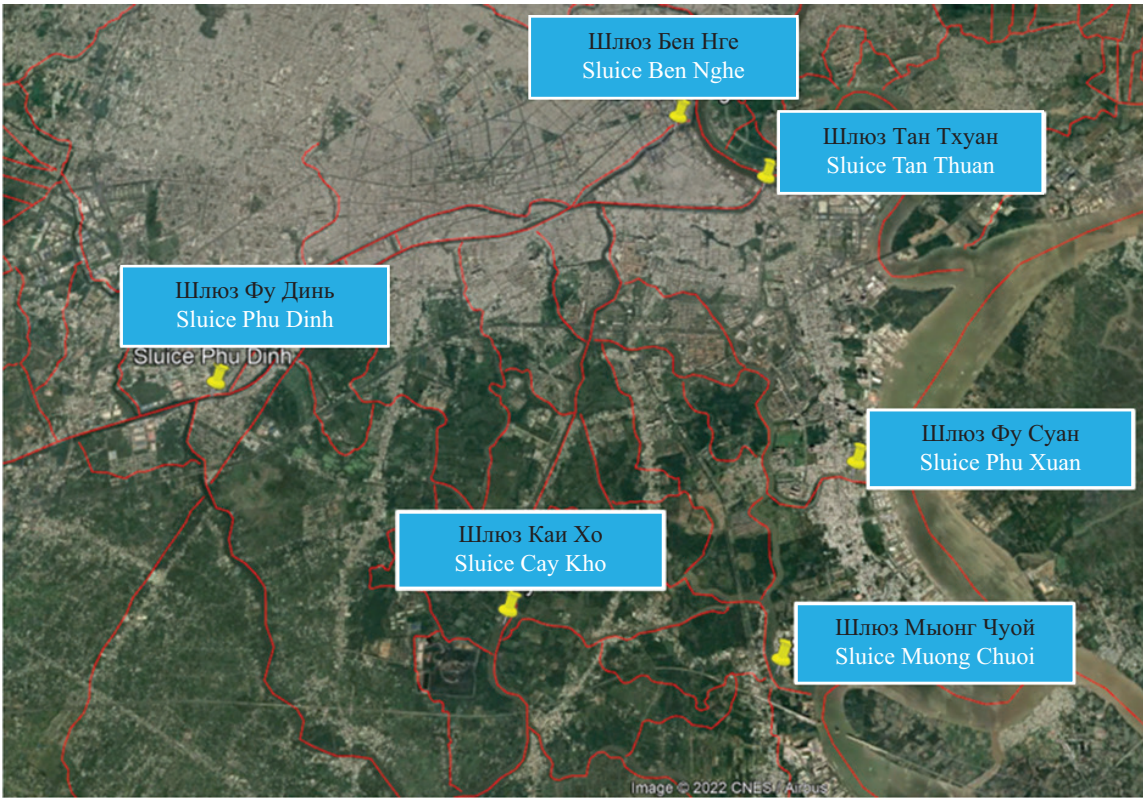


Рис. 2. Положение противопаводковых сооружений

Fig. 2. Position of flood control structures

Табл. 1. Технические параметры шлюзов для контроля приливов и отливов

Table 1. Technical parameters of sluices for tide control

Шлюз Sluices	Фу Динь Phu Dinh	Кай Хо Cay Kho	Бен Нге Ben Nghe	Тан Тхуан Tan Thuan	Фу Суан Phu Xuan	Мьонг Чуой Muong Chuoi
Ширина камеры, м Camera width, m	40	40	40	40	80	160
Количество камеры Number of cameras	1	2	1	1	2	4
Отметка порога, м Threshold mark, m	−5,5	−5,5	−5,5	−5,5	−5,0	−6,5 ÷ −10
Отметка затвора, м Shutter mark, m	+3,0	+3,0	+3,0	+3,0	+3,0	+3,0
Отметка оголовков шлюзы, м Marking of the head gateways, m	+3,5	+3,0	+3,0	+3,5	+3,5	+3,5

хода. Пять основных входных параметров, которые необходимо указать для установки Mike 11 HD, — это схема речной сети, поперечные сечения, граничные условия, гидродинамические параметры и параметры моделирования. Речное поперечное сечение модели показано на рис. 3.

Двумерный Mike 21 решает полные, зависящие от времени, нелинейные уравнения неразрывности и сохранения импульса [14, 15]. Mike 21 разрешает решение, используя неявную конечно-разностную схему второго порядка точности. Входным параметром модели Mike 21 является цифровая модель рельефа, полученная из LiDAR DEM для изучаемой области, которая была обработана для получения батиметрии в качестве входных данных для Mike 21. Разрешение входной батиметрии составляло 30 × 30 м, а принятый временной шаг — 30 с для

различных моделей. На рис. 4 приведена батиметрия, используемая в районе исследования.

Речная сеть Mike 11 была подключена к батиметрии Mike 21 с использованием опции боковой связи, доступной в Mike Flood [16, 17]. Степень затопления и глубина в пойме для избыточной воды рассчитывается с помощью Mike 21. Другие параметры для боковых связей левого и правого берега, такие как коэффициент импульса, коэффициент водослива и коэффициент допустимой глубины, сохраняются по умолчанию. Период моделирования как для Mike 11, так и для Mike 21 был сохранен одинаковым, а шаг расчетного времени модели доведен до низкого значения 30 с, чтобы число Куранта (Cr) было меньше или равно 1, чтобы достичь стабильной симуляции, Mike Flood работает без ошибок. Установка Mike Flood вместе с рекой

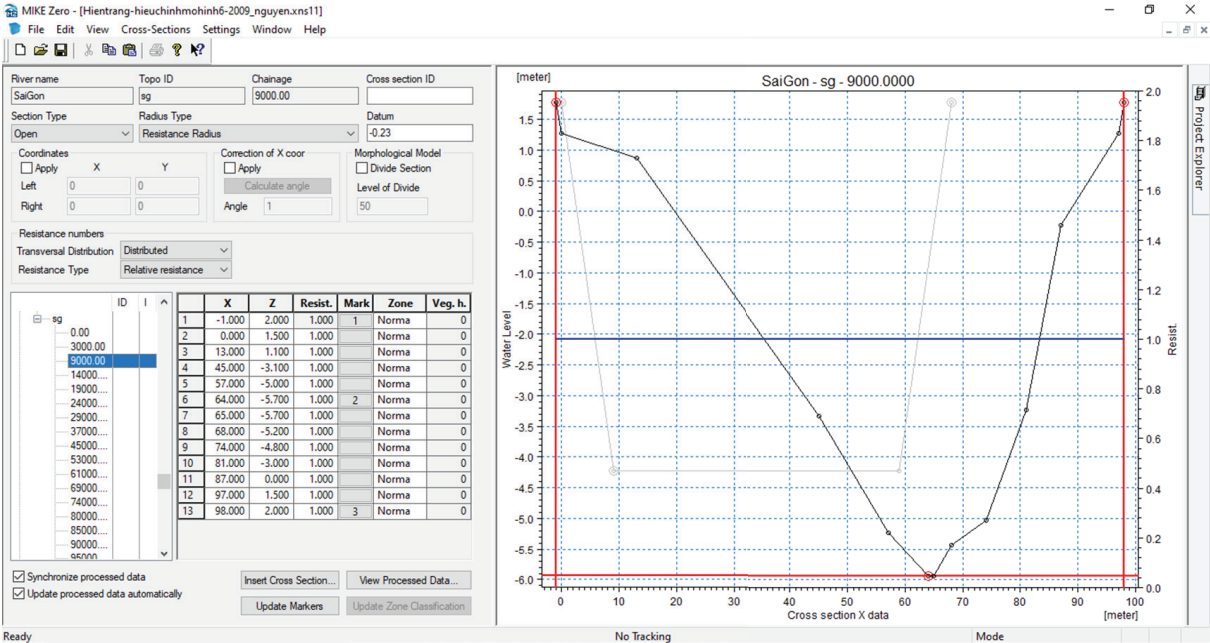


Рис. 3. Речное поперечное сечение модели Mike 11

Fig. 3. River cross-section of the Mike 11 model

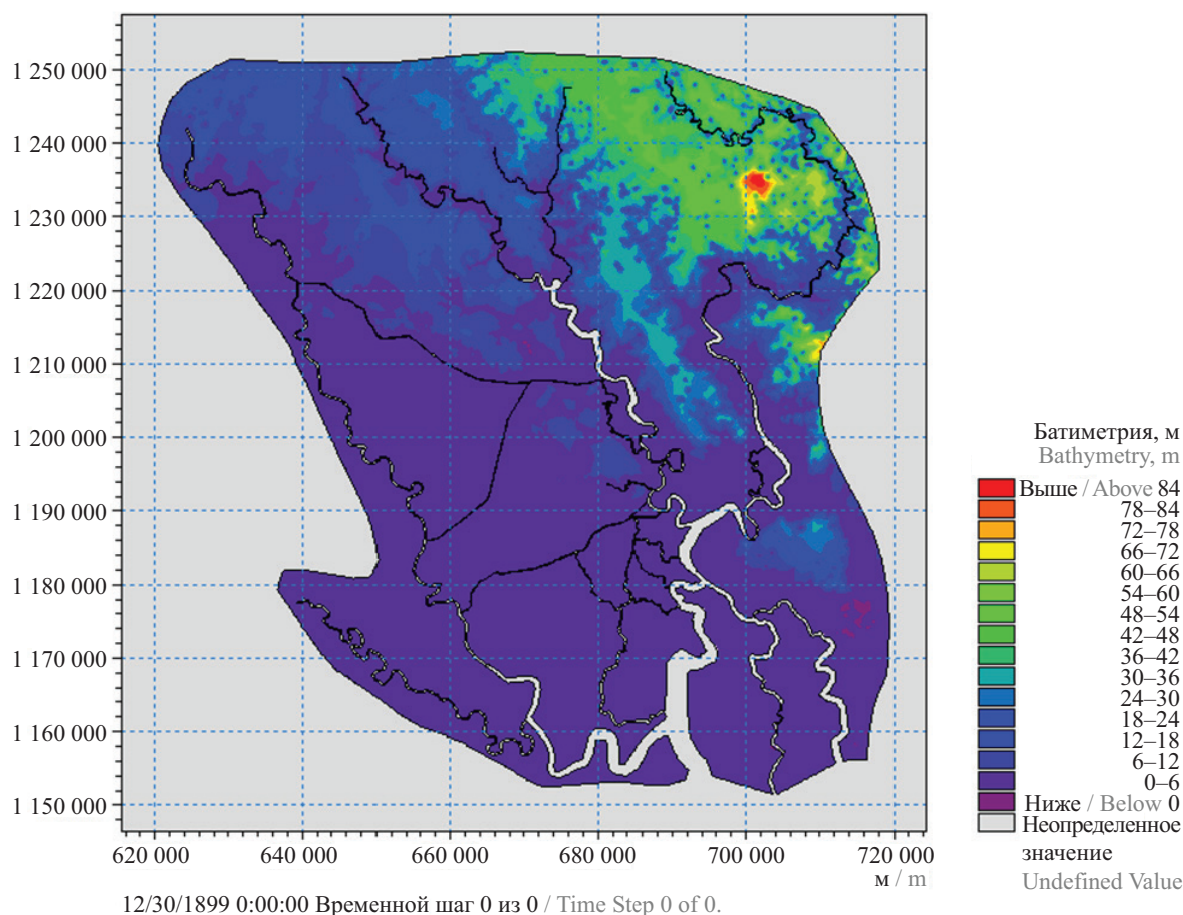


Рис. 4. Батиметрия, используемая в изучаемой области

Fig. 4. Bathymetry used in the studied area

(Mike 11) и обоими боковыми звеньями (Mike 21) показана на рис. 5.

Цель данного исследования — оценка влияния водохранилищ и противопаводковых сооружений на уровень воды в системе р. Сайгон – Донгнай в нижнем течении, поэтому разрабатываются расчетные сценарии по годам с типовыми характеристиками стока на основе расходов из водохранилищ, расположенных вверх по течению. На рис. 6 видно, что за 24 года (1988–2012 гг.) существует закономерность между величиной сброса водоемов в годы. Согласно этому правилу, сток воды из озер через много лет будет достаточно большим, в последующие годы его величина значительно уменьшится. В годы большого стока происходит резкое увеличение расхода стока за 1 год, аналогично в годы с малым стоком из водохранилища происходит резкое уменьшение расхода стока 1 года.

На основе приведенного выше анализа сценарии расчетов построены для периодов паводка (2000 г.), периодов маловодья (2004 г.) и периодов среднего расхода (1998 г.). Эти сценарии представлены в табл. 2.

Кроме того, сценарии также построены с наибольшим расходом $Q_{\max}$, поступающим в водохранилища Зау Тиенг и Чи Ан с частотой $P = 0,1\%$

(происходит один раз в 1000 лет). На самом деле существует множество различных функций распределения вероятностей, которые были предложены для анализа повторяемости экстремальных переменных в гидрологии (расход воды, уровень воды, осадки и т.д.), эти функции часто перечисляются как семейство функций распределения.

К ним относятся семейство нормальных распределений, семейство экстремальных распределений, семейство гамма, семейство бета, семейство Парето, семейство дефиса и многие другие [18, 19]. Примеры: функция Гумбеля в Европе и Японии, функция GEV в Австралии, функция GEV, GNO и Log-Pearson 3 в Канаде, функция Log-Pearson и Pearson 3 в США и функция GLO в Великобритании⁵ [18]. Во Вьетнаме традиционные расчетные характеристики паводков рассчитываются по кривой распределения вероятностей РЕЗ или GEV [11, 20, 21]. Поэтому значения $Q_{\max}$ ($P = 0,1\%$) рассчитываются функцией распределения частоты GEV.

Из частотных кривых распределений на рис. 7 значения $Q_{\max}$ ($P = 0,1\%$) были определе-

⁵ WMO. Water resources management and application of hydrological practice. Guide to hydrological practice. 2009. No. 168. 302 p.

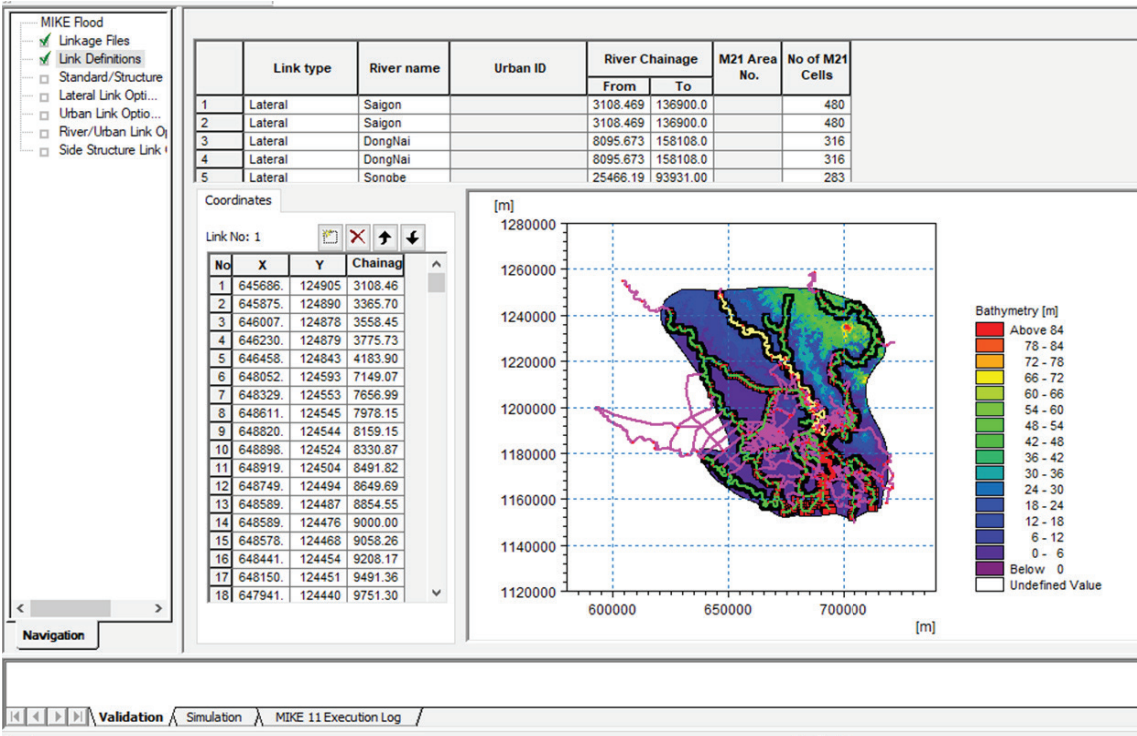


Рис. 5. Схема подключения Mike 11 и Mike 21 в Mike Flood

Fig. 5. Connection diagram of Mike 11 and Mike 21 in Mike Flood

Табл. 2. Сценарии численного моделирования

Table 2. Numerical simulation scenarios

Сценарии / Scenarios	Описание граничного условия / Description of the boundary condition
Сценарий 1 / Scenario 1	Вверх по течению: расход 1998 г. Вниз по течению: уровень приливов на измерительной станции Вунг Тау Upstream: Discharge of 1998 Downstream: tidal level at the Vung Tau measuring station of 1998
Сценарий 2 / Scenario 2	Вверх по течению: расход 2000 г. Вниз по течению: уровень приливов на измерительной станции Вунг Тау Upstream: Discharge of 2000 Downstream: Tidal level at the Vung Tau measuring station of 2000
Сценарий 3 / Scenario 3	Вверх по течению: расход 2004 г. Вниз по течению: уровень приливов на измерительной станции Вунг Тау Upstream: Discharge of 2004 Downstream: tidal level at the Vung Tau measuring station of 2004
Сценарий 4 / Scenario 4	Вверх по течению: Q_{max} при $P = 0,1 \%$ / Вниз по течению: уровень приливов на измерительной станции Вунг Тау ($H_{max} = 1,48$ м) Upstream: Q_{max} at $P = 0.1 \%$ Downstream: tidal level at the Vung Tau measuring station ($H_{max} = 1.48$ m)

ны как 1054,5 м³/с (водохранилище Зау Тиенг) и 4870,16 м³/с (водохранилище Чи Ан) соответственно. Информация о расходах воды в водохранилищах используется для создания файлов исходных данных в области верхнего течения для модели Mike 11 (рис. 8).

Между тем уровень приливов на измерительной станции Вунг Тау в 1998, 2000 и 2004 гг. используется в качестве входных данных в нижней части модели Mike 11. При двух сценариях $P = 0,1 \%$ и расчетном Q уровень воды на станции Вунг Тау

принимается равным 1,48 м (наибольшее значение в период с 1980–2014 гг.).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Калибровка и проверка модели

Модель откалибрована с использованием фактических данных, измеренных на гидрологических станциях с 1 октября 2012 г. по 31 декабря 2012 г. Коэффициенты Мэннинга (Manning) и начальный уровень воды в реках скорректированы на разницу между смоделированными и реальными уровнями

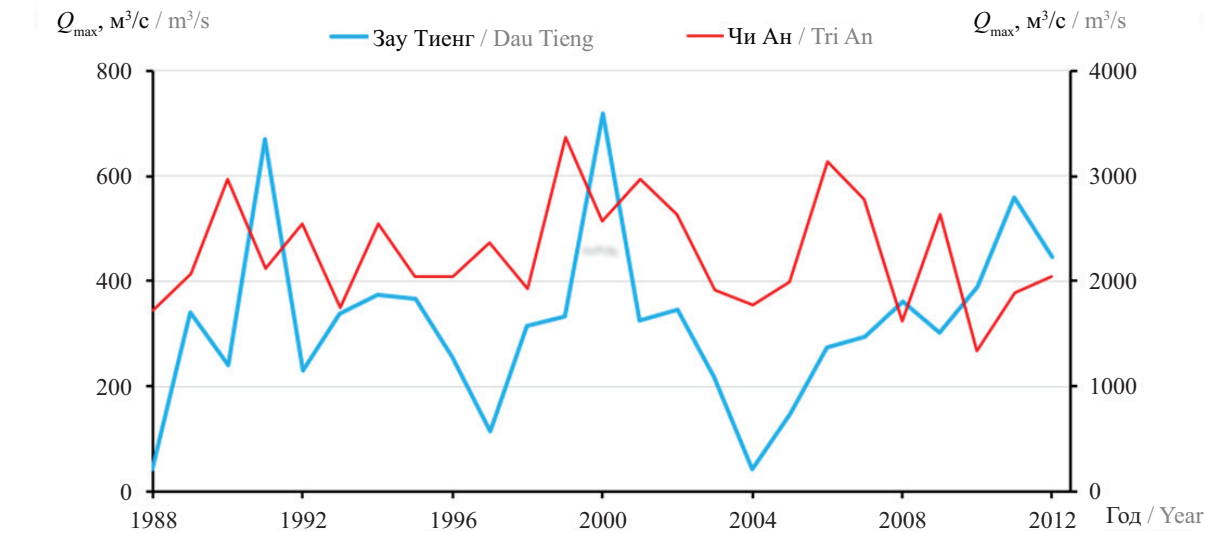


Рис. 6. Объем расхода воды в водохранилищах в период 1991–2011 гг.
Fig. 6. The volume of water consumption came in reservoirs in the period 1991–2011

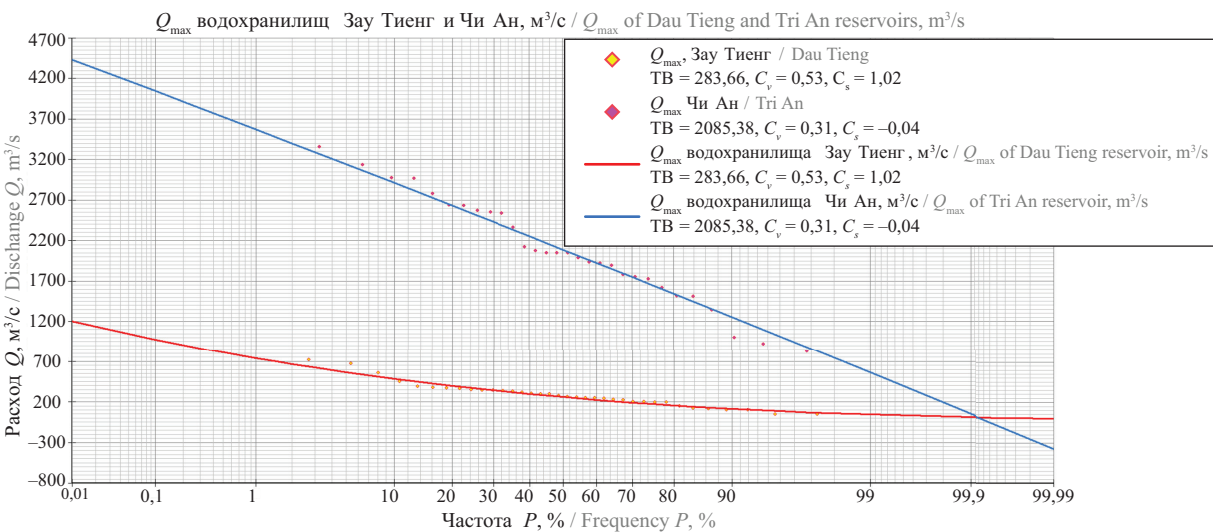


Рис. 7. Кривая частотного распределения $Q_{\max}$ водохранилищ Зау Тиенг и Чи Ан
Fig. 7. Frequency distribution curves $Q_{\max}$ of Dau Tieng and Tri An reservoirs

воды, измеренными на самых низких станциях Тху Зау Мот, Бьен Хоа, Фу Ан, Нха Бе и Бен Люк. Почасовые уровни воды во время калибровки и проверки на станциях Бьен Хоа, Фу Ан с 1 октября 2000 г. по 16 октября 2000 гг. показаны на рис. 9. Видно хорошее соответствие между смоделированными и наблюдаемыми уровнями воды в разные периоды времени.

Точность численных результатов оценивали с помощью коэффициента детерминации R^2 и коэффициента Нэша – Сатклиффа E_f (Nash – Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE)). Значения NSE для часовой калибровки и проверки на всех станциях приведены в табл. 3. Согласно критериям эффективности Мориаси [22], коэффициенты R^2 и E_f показывают, что модель

обладает высокой надежностью при моделировании течения в нижнем бьефе, район р. Сайгон – Донгнай.

Результаты

Для того чтобы лучше рассмотреть изменение расхода стока на реках Сайгон и Донгнай при изменении объема стока водохранилищ, помимо основных измерительных пунктов, в данной работе выбраны точки C1-C4 на р. Сайгон и Д1-Д8 на р. Донгнай для анализа. Эти точки отмечены на рис. 10, результаты расчета по сценариям представлены в табл. 4, 5.

Данные табл. 4 показывают, что при увеличении расхода стока из водохранилищ по соответствующим сценариям уровень воды на измерительных постах на реках Сайгон и Донгнай меняется, но это

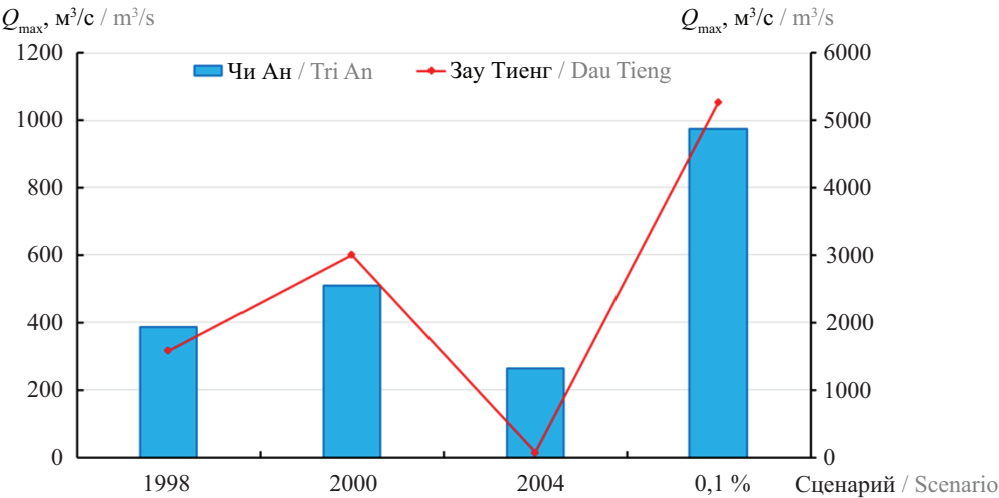


Рис. 8. Данные о расходах воды в водохранилищах
Fig. 8. Data on water consumption in reservoirs

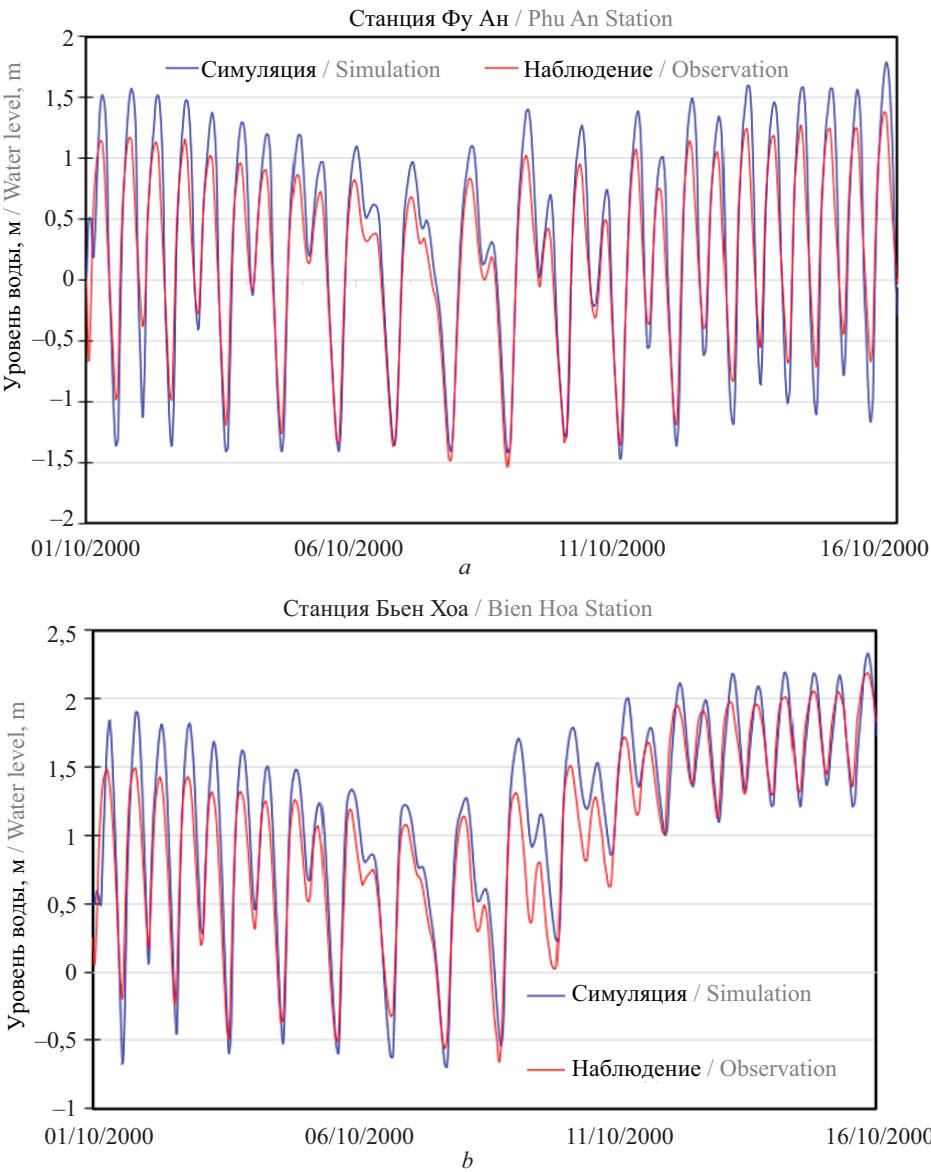


Рис. 9. График сравнения наблюдаемого и смоделированного уровня воды на станциях Фу Ан (a); Бьен Хоа (b)
Fig. 9. Comparison graph of the observed and simulated water level at the stations of Phu An (a); Bien Hoa (b)

Табл. 3. Производительность MIKE 11 для моделирования уровня воды

Table 3. The performance of MIKE 11 for water level modelling

Станция Station	Калибровка / Calibration		Проверка / Validation	
	(01.10.2012 – 31.12.2012)		(01.10.2000 – 16.10.2000)	
	R^2	E_f	R^2	E_f
Бьен Хоа / Bien Hoa	0,95	0,81	0,93	0,87
Фу Ан / Phu An	0,97	0,86	0,96	0,81

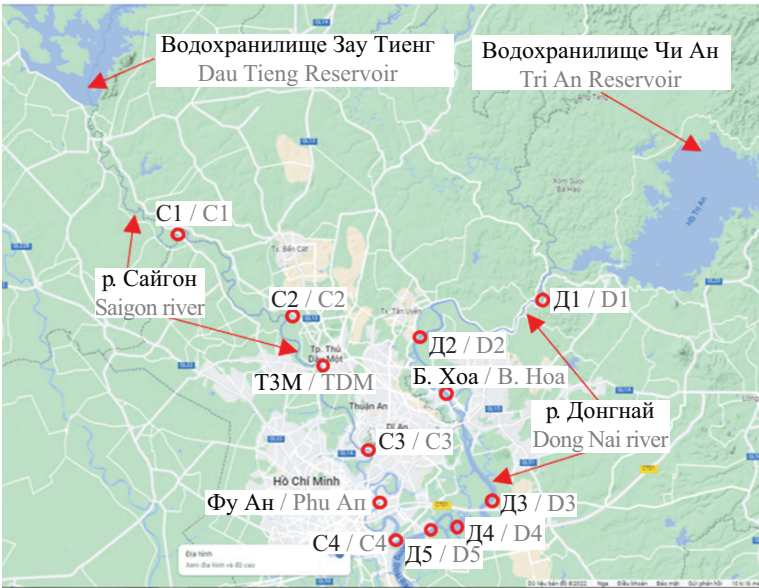


Рис. 10. Расположение дополнительных точек на р. Сайгон – Донгнай

Fig. 10. Location of additional points on the Saigon – Dong Nai river

Табл. 4. Уровень воды на измерительных станциях рассчитан при открытии шлюзов, м

Table 4. The water level at the measuring stations is calculated when the sluices are opened, m

Год Years	C1 C1	C2 C2	T3M TDM	C3 C3	Фу Ан Phu An	C4 C4	Д1 D1	Д2 D2	Б. Хоа В. Hoa	Д3 D3	Д4 D4	Д5 D5
2004	1,55	1,57	1,55	1,53	1,65	1,70	3,96	1,96	1,83	1,74	1,72	1,68
1998	1,71	1,62	1,58	1,57	1,67	1,73	5,99	2,60	1,87	1,78	1,74	1,70
2000	2,29	1,76	1,70	1,67	1,77	1,80	8,97	4,19	2,20	1,88	1,85	1,80
0,1 %	3,48	2,01	1,94	1,86	2,00	2,04	12,51	6,63	3,06	2,13	2,08	2,01

изменение неодинаково на двух реках. На р. Сайгон в расчетных сценариях уровень воды постепенно повышается от станции C1 до станции Тху Зау Мот, затем резко снижается на станции C3 и снова повышается на станциях Фу Ан и C4, но уровень воды повышается незначительно. Это доказывает, что сток из водохранилища Зау Тиенг напрямую влияет только на участок реки от озера до измерительной станции Тху Зау Мот, на оставшийся участок р. Сайгон дополнительно влияет прилив Восточного моря. Между тем изменение уровня воды на измерительных станциях на всем протяжении р. Донгнай от о. Чи Ан до моря подчиняется тому же правилу, согласно которому в каждом сценарии чем

ниже уровень воды снижается, тем ниже по течению снижается уровень воды, ближе измерительные станции к водохранилищу (Д1, Д2, Бьен Хоа), изменение уровня воды по сценариям более выражено, чем на других станциях (Д3–Д5). Тем более уровень воды на Д5 во всех четырех сценариях практически не меняется, хотя объем стока вверх по течению многократно увеличился. Это показывает, что измерительная станция находится под влиянием приливов, даже станции Д3, Д4 подвержены аналогичному воздействию, хотя уровень влияния неясен по сравнению со станцией Д5. Это правило более наглядно видно на графике (рис. 11).

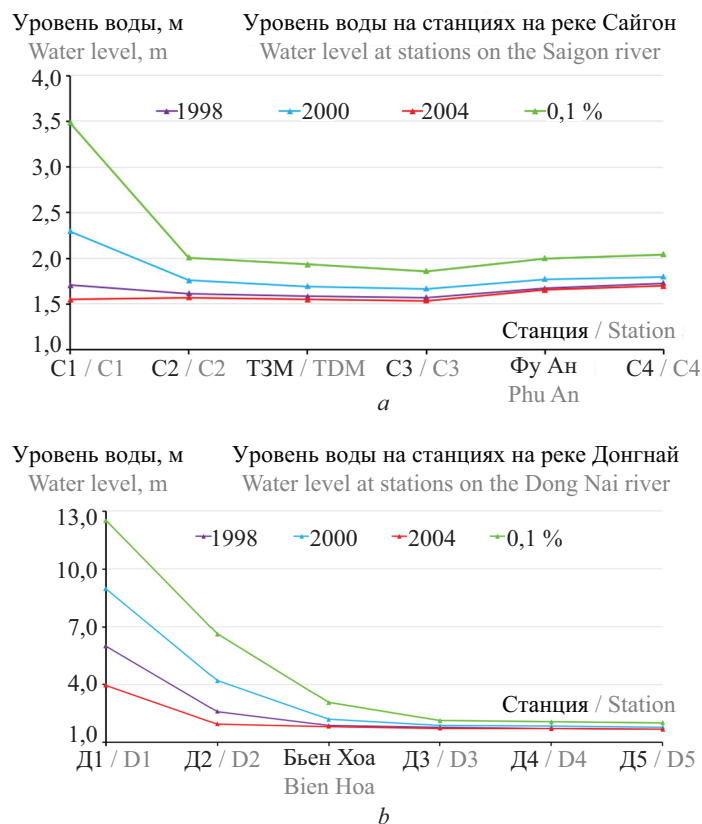


Рис. 11. Максимальный уровень воды на станциях при открытии затворов противопаводковых сооружений

Fig. 11. The maximum water level at the stations when gates of flood control structures are opened

Для оценки влияния противопаводковых сооружений на уровень воды в реках используются результаты расчетов на станциях измерения по модели, представленной в табл. 5.

Из данных табл. 5 установлено, что при закрытии шлюзов противопаводковых сооружений уровень воды на водомерных постах повышается, но повышение уровня воды неравномерно. Амплитуда колебаний уровня воды на станциях Фу Ан и С4 больше, чем на других станциях, хотя расположение станций Д6 и Д7 ближе к противопаводковым сооружениям, чем станции Фу Ан и С4. Кроме того, хотя уровень воды на двух станциях Phu An и С4 имеет больший подъем по амплитуде, чем на остальных станциях, в целом подъем не большой (всего 4–6 см).

Для более конкретной оценки влияния противопаводковых сооружений на уровень воды на р. Сайгон – Донгнай в данной работе используется программа Mike Flood для моделирования наводнения 2000 г. Результатом моделирования является двухмерная карта затопленных территорий, представленная на рис. 12.

Из рис. 12 видно, что площадь затопления при закрытых шлюзах меньше, чем при открытых. В частности, центральная территория, расположенная внутри шести шлюзов, значительно уменьшила площадь затопления. Согласно результатам расчетов по модели, при отсутствии противопаводковых сооружений площадь затопленных участков составляет 1451,48 км², а при проведении этих работ

Табл. 5. Уровень воды на измерительных станциях, рассчитанный при открытии и закрытии шлюзов, м

Table 5. The water level at the measuring stations is calculated at the opening and closing of the locks, m

Год Years	При открытии шлюзов / When the gates open					При закрытии шлюзов / When the gates close				
	Фу Ан Phu An	С4 C4	Д6 D6	Д7 D7	Д8 D8	Фу Ан Phu An	С4 C4	Д6 D6	Д7 D7	Д8 D8
2000	1,77	1,8	1,73	1,64	1,57	1,81	1,84	1,75	1,67	1,59
2004	1,65	1,7	1,61	1,59	1,54	1,7	1,74	1,64	1,61	1,56
1998	1,67	1,73	1,65	1,57	1,46	1,72	1,77	1,68	1,59	1,48
0,1 %	2	2,04	1,91	1,85	1,75	2,06	2,09	1,94	1,88	1,78

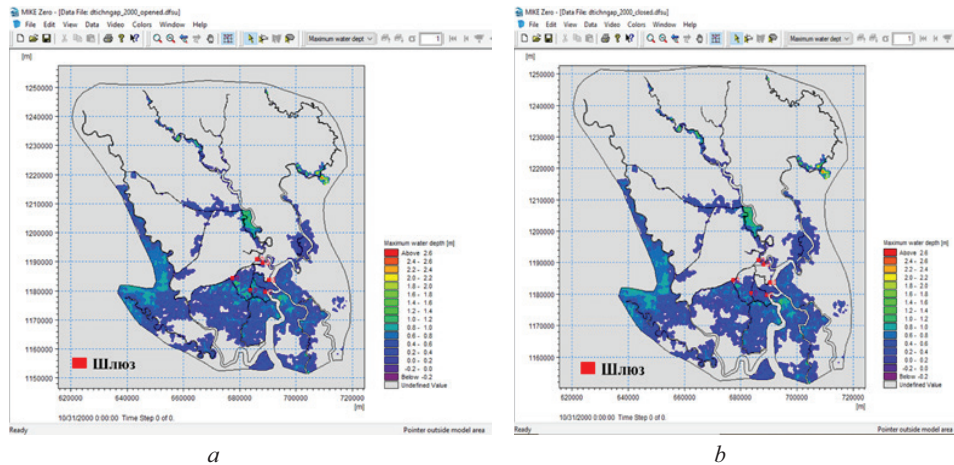


Рис. 12. Максимальный уровень воды в нижнем течении р. Сайгон – Донгнай: *a* — при открытии шлюзов; *b* — при закрытии шлюзов

Fig. 12. The maximum water level in the lower reaches of the SG – DN river: *a* — when opening the gates; *b* — when closing the gates

площадь затопленных участков сокращается всего на 55,14 км², остается только 1396,34 км² (табл. 6).
Данные табл. 6 показывают, что при эксплуатации противопаводковых сооружений площадь затопляемых участков будет уменьшаться, а сильнозатопляемых с $H_{\max} > 2$ м увеличиваться. Эти районы в основном сосредоточены вдоль р. Донгнай в районе Винь Куу провинции Донгнай и в г. Тан Юен провинции Бинь Зыонг. Район Ку Чи, мост Бен Сук также имеет большой уровень наводнения ($H_{\max}$ составляет около 2 м). Когда шлюзы будут закрыты, район Тхань Ми Лой, Фу Хуу, Лонг Чыонг и Лонг Фуок в г. Тху Дык, район Там Ан в провинции Донгнай также будут затоплены с максимальным уровнем воды от 0,2 до 1 м.

надежны для моделирования гидравлического режима в нижнем течении р. Сайгон – Донгнай.
Данные о стоке воды в водохранилищах Зау Тиенг и Чи Ан показывают, что сток рек Сайгон – Донгнай меняется каждый год по схеме: годы половодья сменяются годами маловодья. Отсюда было построено 4 сценария расчета для паводкового (2000 г.), маловодного (2004 г.), средневодного (1998 г.) и многоводного года с частотой $P = 0,1$ %.
Результаты расчетов свидетельствуют, что: уровень воды на р. Сайгон от верхнего течения до измерительной станции Тху Зау Мот напрямую зависит от водохранилища Зау Тиенг, а о. Чи Ан напрямую

Табл. 6. Площадь затопляемого участка по $H_{\max}$, км²
Table 6. The area of the flooded area according to $H_{\max}$, km²

$H_{\max}$, м / m	При открытии шлюзов When opening the gates	При закрытии шлюзов When closing the gates
$H_{\max} \leq 1$ м / m	1413,32	1361,66
$1 \text{ м} / \text{м} < H_{\max} \leq 2 \text{ м} / \text{м}$	35,54	31,98
$2 \text{ м} / \text{м} < H_{\max} \leq 3 \text{ м} / \text{м}$	2,48	2,52
$H_{\max} > 3 \text{ м} / \text{м}$	0,15	0,17
Общая площадь / Total area	1451,48	1396,34

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки влияния водохранилищ и противопаводковых сооружений на уровень воды нижнего течения р. Сайгон – Донгнай применялись программы Mike 11, Mike 21 и Mike Flood. Расчетная модель создана, откалибрована и проверена в период с 06.01.2011 г. по 16.06.2011 г. Расчетная модель была настроена, откалибрована и проверена в период с 01.10.2000 г. по 16.10.2000 г. Коэффициенты R^2 и E_f выше 0,80 свидетельствуют о том, что модель и установленные в модели параметры достаточно

влияет на уровень воды на участке реки за плотиной Три Ан до станции ДЗ (Лонг Фуок – район Там Ан).
При закрытии затворов противопаводкового сооружения уровень воды в реке поднимается, но неравномерно. Амплитуда колебаний уровня воды на станциях Фу Ан и С4 наибольшая (от 4–6 см). В связи с историческим наводнением 2000 г. закрытие затворов противопаводковых работ уменьшит затопленную центральную территорию (площадь затопления уменьшится на 55,14 км²), но повысит уровень затопленной воды в районах города Тху Дык и района Там Ан.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hallegatte S., Green K., Nicholls R.J., Corfee-Morlot J. Future flood losses in major coastal cities // *Nature Climate Change*. 2013. Vol. 3. Issue 9. Pp. 802–806. DOI: 10.1038/nclimate1979
2. Tu T. Combined impact of climate and land use changes on streamflow and water quality in eastern Massachusetts, USA // *Journal of Hydrology*. 2009. Vol. 379. Issue 3–4. Pp. 268–283. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.10.009
3. Jongman B., Ward P.J., Aerts J.K. Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes // *Global Environmental Change*. 2012. Vol. 22. Issue 4. Pp. 823–835. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2012.07.004
4. Karamuz M., Ahmadvand F., Zahmatkesh Z. Distributed hydrologic modeling of coastal flood inundation and damage: nonstationary approach // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2017. Vol. 143. Issue 8. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001173
5. Lasage R., Veldkamp T., de Moel H., Van T., Fee H., Vellinga P. *Et al.* Assessment of the effectiveness of flood adaptation strategies for HCMC // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2014. Vol. 14. Issue 6. Pp. 1441–1457. DOI: 10.5194/nhess-14-1441-2014
6. Adikari Y., Osti R., Noro T. Flood-related disaster vulnerability: an impending crisis of megacities in Asia // *Journal of Flood Risk Management*. 2010. Vol. 3. Issue 3. Pp. 185–191. DOI: 10.1111/j.1753-318x.2010.01068.x
7. Storch H., Downes N.K. A scenario-based approach to assess Ho Chi Minh City's urban development strategies against the impact of climate change // *Cities*. 2011. Vol. 28. Issue 6. Pp. 517–526. DOI: 10.1016/j.cities.2011.07.002
8. Nguyen K.P., Le T.T.A. An applied SWAT model for assessing the impact of climate change // *Journal of Hydraulic Sciences and Technologies*. 2012. No. 12. Pp. 96–101.
9. Do D.D., Nguyen N.A., Doan T.H. Assessment of changes in water resources in the Dong Nai River Basin and its environs // *Science, Technology, Irrigation and Environment*. 2014. No. 47. Pp. 19–26.
10. Nguyen T.A., Nguyen D.L. Application of the SWAT model and GIS technology for runoff estimation in the Dak Bla River Basin // *Scientific Journal of Internal Affairs of the Hanoi National University, Earth and Environmental Sciences*. 2013. No. 29 (3). Pp. 1–13.
11. Le T.H.B., Dang D.N. Non-stationary extreme value analysis for design rainfall estimation in Ho Chi Minh City // *Journal of Science and Technology on Irrigation and the Environment*. 2020. No. 69. URL: <https://www.researchgate.net/publication/351934507>
12. Do D.H. Assessing the impact of urbanization, the construction of waterproofing structures on the already implemented Dong Nai – Sai Gon // *Water Resources Scientific and Technical Journal*. 2018. No. 49. Pp. 1–9.
13. Nguyen P.K., Da D.H., Da H.L., Jin T.T.T. Evaluation of water indicators and changes in the water level of the Saigon River under the influence of Dau Tieng // *Water Resources Scientific and Technical Journal*. 2018. No. 44. Pp. 25–39.
14. Shrestha A., Bhattacharjee L., Baral S., Thakur B., Joshi N., Kalra A. *et al.* Understanding Suitability of MIKE 21 and HEC-RAS for 2D Floodplain Modeling // *World Environmental and Water Resources Congress 2020*. 2020. DOI: 10.1061/9780784482971.024
15. Filipova V., Rana A., Singh P. Urban flooding in Gothenburg — MIKE21 study // *VATTEN — Journal of Water Management and Research*. 2012. No. 68. Pp. 175–184. URL: https://www.tidskriftenvatten.se/wp-content/uploads/2017/04/48_article_4593.pdf
16. Kadam P., Sen D. Flood inundation simulation in Ajoy River using MIKE-FLOOD // *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 2012. Vol. 18. Issue 2. Pp. 129–141. DOI: 10.1080/09715010.2012.695449
17. Vidyapriya V., Ramalingam M. Flood mitigation study in adayar river using mike-flood // *The Journal of Scientific and Engineering Research*. 2016. Vol. 7. Issue 7. Pp. 709–716. URL: <https://www.researchgate.net/publication/331222587>
18. Hosking J.R.M. Regional frequency analysis: an L-moment approach. Cambridge University Press, 1997. Pp. 200–224.
19. Rao A.R., Hamed K.H. Flood frequency analysis. CRC Publications, New York, 2000. URL: <https://scirp.org/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1693657>
20. Luong T.A., Nguyen T.S., Dang T.H. Evaluation of the results of calculation of design floods for different frequency lines // *Scientific journal of VNU: Science and technology*. 2015. No. 31. Pp. 1–5.
21. Vo V.T., Nguyen D.T., Le T.H.B., Dang D.N. Analysis of non-stationary extreme values for estimation of the calculated water level of Vung Tau station // *Journal of Irrigation and Environmental Sciences and Technologies*. 2020. No. 71. Pp. 65–70.
22. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations // *Transactions of the ASABE*. 2007. Vol. 50. Issue 3. Pp. 885–900. DOI: 10.13031/2013.23153

Поступила в редакцию 5 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 14 июня 2023 г.

Одобрена для публикации 14 июня 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ирина Михайловна Маркова** — кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 378281, Scopus: 57205218160, ResearcherID: AAC-6662-2022, ORCID: 0000-0002-7167-7241; markova@mgsu.ru;

Фан Хань Хань — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 5282-4194, ResearcherID: HMD-3056-2023, ORCID: 0000-0003-4368-1582; pkhanhkhanh@gmail.com.

Вклад авторов:

Маркова И.М. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

Фан Хань Хань — проведение исследования, написание исходного текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

- Hallegatte S., Green K., Nicholls R.J., Corfee-Morlot J. Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*. 2013; 3(9):802-806. DOI: 10.1038/nclimate1979
- Tu T. Combined impact of climate and land use changes on streamflow and water quality in eastern Massachusetts, USA. *Journal of Hydrology*. 2009; 379(3-4):268-283. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.10.009
- Jongman B., Ward P.J., Aerts J.K. Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes. *Global Environmental Change*. 2012; 22(4):823-835. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2012.07.004
- Karamuz M., Ahmadvand F., Zahmatkesh Z. Distributed hydrologic modeling of coastal flood inundation and damage: nonstationary approach. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2017; 143(8). DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001173
- Lasage R., Veldkamp T., de Moel H., Van T., Fee H., Vellinga P. et al. Assessment of the effectiveness of flood adaptation strategies for HCMC. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2014; 14(6):1441-1457. DOI: 10.5194/nhess-14-1441-2014
- Adikari Y., Osti R., Noro T. Flood-related disaster vulnerability: an impending crisis of megacities in Asia. *Journal of Flood Risk Management*. 2010; 3(3):185-191. DOI: 10.1111/j.1753-318x.2010.01068.x
- Storch H., Downes N.K. A scenario-based approach to assess Ho Chi Minh City's urban development strategies against the impact of climate change. *Cities*. 2011; 28(6):517-526. DOI: 10.1016/j.cities.2011.07.002
- Nguyen K.P., Le T.T.A. An applied SWAT model for assessing the impact of climate change. *Journal of Hydraulic Sciences and Technologies*. 2012; 12:96-101.
- Do D.D., Nguyen N.A., Doan T.H. Assessment of changes in water resources in the Dong Nai River Basin and its environs. *Science, Technology, Irrigation and Environment*. 2014; 47:19-26.
- Nguyen T.A., Nguyen D.L. Application of the SWAT model and GIS technology for runoff estimation in the Dak Bla River Basin. *Scientific Journal of Internal Affairs of the Hanoi National University, Earth and Environmental Sciences*. 2013; 29(3):1-13.
- Le T.H.B., Dang D.N. Non-stationary extreme value analysis for design rainfall estimation in Ho Chi Minh City. *Journal of Science and Technology on Irrigation and the Environment*. 2020; 69. URL: <https://www.researchgate.net/publication/351934507>
- Do D.H. Assessing the impact of urbanization, the construction of waterproofing structures on the already implemented Dong Nai – Sai Gon. *Water Resources Scientific and Technical Journal*. 2018; 49:1-9.
- Nguyen P.K., Da D.H., Da H.L., Jin T.T.T. Evaluation of water indicators and changes in the water level of the Saigon River under the influence of Dau Tieng. *Water Resources Scientific and Technical Journal*. 2018; 44:25-39.
- Shrestha A., Bhattacharjee L., Baral S., Thakur B., Joshi N., Kalra A. et al. Understanding Suitability of MIKE 21 and HEC-RAS for 2D Floodplain Modeling. *World Environmental and Water Resources Congress 2020*. 2020. DOI: 10.1061/9780784482971.024
- Filipova V., Rana A., Singh P. Urban flooding in Gothenburg – MIKE21 study. *VATTEN — Journal of Water Management and Research*. 2012; 68:175-184. URL: https://www.tidskriftenvatten.se/wp-content/uploads/2017/04/48_article_4593.pdf
- Kadam P., Sen D. Flood inundation simulation in Ajoy River using MIKE-FLOOD. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 2012; 18(2):129-141. DOI: 10.1080/09715010.2012.695449
- Vidyapriya V., Ramalingam M. Flood mitigation study in adayar river using mike-flood. *The Journal of Scientific and Engineering Research*. 2016; 7(7):709-716. URL: <https://www.researchgate.net/publication/331222587>
- Hosking J.R.M. *Regional frequency analysis: an L-moment approach*. Cambridge University Press, 1997; 200-224.

19. Rao A.R., Hamed K.H. *Flood frequency analysis*. CRC Publications, New York, 2000. URL: <https://scirp.org/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1693657>
20. Luong T.A., Nguyen T.S., Dang T.H. Evaluation of the results of calculation of design floods for different frequency lines. *Scientific journal of VNU: Science and technology*. 2015; 31:1-5.
21. Vo V.T., Nguyen D.T., Le T.H.B., Dang D.N. Analysis of non-stationary extreme values for estimation of the calculated water level of Vung Tau station. *Journal of Irrigation and Environmental Sciences and Technologies*. 2020; 71:65-70.
22. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*. 2007; 50(3):885-900. DOI: 10.13031/2013.23153

Received February 5, 2023.

Adopted in revised form on June 14, 2023.

Approved for publication on June 14, 2023.

B I O N O T E S: **Irina M. Markova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 378281, Scopus: 57205218160, ResearcherID: AAC-6662-2022, ORCID: 0000-0002-7167-7241; markova@mgsu.ru;

Phan Khanh Khanh — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 5282-4194, ResearcherID: HMD-3056-2023, ORCID: 0000-0003-4368-1582; pkhanhkhanh@gmail.com.

Contribution of the authors:

Irina M. Markova — conceptualization, methodology, development of methodology, scientific editing of the text, final conclusions.

Phan Khanh Khanh — data gathering and processing, writing of the article, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.