

Исследование наводнения в нижнем течении
рек Сайгон – Донгнай

Ирина Михайловна Маркова, Фан Хань Хань
Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Район в нижнем течении рек Сайгон – Донгнай в целом, и г. Хошимин в частности, является крупным, быстро развивающимся экономическим центром Вьетнама. Он сталкивается со многими насущными проблемами, из которых нерешенными остаются нехватка жилья и наводнения. Приводятся результаты исследования наводнения в нижнем течении рек Сайгон – Донгнай.

Материалы и методы. Область исследования — район нижнего течения рек Сайгон – Донгнай, где расположен г. Хошимин. Этот район граничит с дельтой Меконга на западе и Восточным морем на юго-востоке. На речной сток в районе исследования непосредственное влияние оказывает работа двух водохранилищ Зау Тиенг и Чи Ан, расположенных выше по течению. Используются модели MIKE 11, MIKE 21 и MIKE FLOOD для оценки площади и глубины затопления с противопаводковыми сооружениями и без них, что дает ориентир для каждого здания и зоны затопления.

Результаты. Результаты расчетов показали, что ввод в эксплуатацию противопаводковых сооружений будет способствовать защите от наводнения центральных районов города, уменьшится площадь затопления, при этом затопление внешних территорий при работе гидротехнических сооружений возрастает.

Выводы. Расчетное обоснование глубины для каждой зоны затопления и установка контрольных строительных отметок, необходимых для территориального планирования, могут стать научно обоснованным вкладом в работу городских органов планирования и управления строительством Хошимина при разработке мероприятий по минимизации ущерба от наводнения в ближайшем будущем. Отмечая, что противопаводковые сооружения не обеспечат гарантированную защиту территории Хошимина и прилегающих провинций от наводнений и затоплений, предложенные новые контрольные строительные отметки являются существенным научным вкладом в проекты территориального планирования при создании в нижнем течении речной системы Сайгон – Донгнай крупнейшего ультрасовременного центра Азиатско-Тихоокеанского региона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наводнения, нижнее течение рек Сайгон – Донгнай, водохранилище Зау Тиенг, водохранилище Чи Ан, MIKE 11, MIKE 21 и MIKE FLOOD

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Маркова И.М., Фан Хань Хань. Исследование наводнения в нижнем течении рек Сайгон – Донгнай // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 1. Ст. 2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.2

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

Flood study in the downstream of the rivers Sai Gon – Dong Nai

Irina M. Markova, Phan Khanh Khanh
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The lower Sai Gon – Dong Nai area in general and Ho Chi Minh City in particular is a major economic and financial centre of Viet Nam, but faces many pressing problems, of which the unresolved are housing shortages and flooding. This paper presents the results of a study of flooding in the lower reaches of the rivers Sai Gon – Dong Nai.

Materials and methods. This study uses the MIKE 11, MIKE 21 and MIKE FLOOD models to estimate the area and depth of flooding with and without flood control structures, providing a benchmark for each building and flood zone.

Results. The calculation results showed that the commissioning of flood control structures will help protect the central areas of the city from flooding, the flood area will decrease, while the flooding of external areas during the operation of hydraulic structures increases.

Conclusions. Calculating the depth for each flood zone and establishing reference-building elevations necessary for spatial planning can provide scientific input to the Ho Chi Minh City planning and construction management authorities in developing measures to minimize flood damage in the near future.

KEYWORDS: floods, downstream of the rivers Sai Gon – Dong Nai, Dau Tieng Reservoir, Tri An Reservoir, MIKE 11, MIKE 21 and MIKE FLOOD

FOR CITATION: Markova I.M., Phan Khanh Khanh. Flood study in the downstream of the rivers Sai Gon – Dong Nai. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(1):2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.2

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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время крупные города мира сталкиваются с чрезмерным ростом населения, проблемами занятости и социального обеспечения жителей мегаполисов, защиты окружающей среды и др. Во Вьетнаме стремительная урбанизация последних десятилетий стала важным этапом развития. В 1986 г. городское население Вьетнама составляло менее 13 млн чел., сегодня в городах проживает более 30 млн чел. Хошимин является крупнейшим городом Вьетнама с населением по состоянию на 2021 г. 9 166 800 чел. (что составляет 9,3 % населения Вьетнама), плотность населения в среднем 4375 чел/км² (самый высокий показатель в стране). Быстрый рост населения и высокая плотность привели к жилищным проблемам и загрязнению окружающей среды. Согласно статистике Фонда ООН в области народонаселения (UNFPA), в Хошимине свыше 300 тыс. чел. до сих пор живут в трущобах. Для решения этой проблемы власти Хошимина, в соответствии с решением № 4834 городского Народного комитета, заявили о намерении к 2030 г. обеспечить новым жильем свыше двух миллионов человек, а также провести масштабную реконструкцию и модернизацию жилых домов и набережных вдоль городских каналов, построенных до 1975 г.

Планируется провести масштабную реконструкцию и модернизацию района Тху Тхем, расположенного в центральной части города. Полуостров на р. Сайгон станет новым ультрасовременным культурным, экономическим и туристическим центром Хошимина (рис. 1). Концепцией развития Хошимина определено формирование современного мегаполиса с высоким качественным уровнем жизни (решение № 5193 Народного комитета Хошимина), где установлено, что к 2060 г. Хошимин станет экономическим и международным торговым центром не только Вьетнама, но и всего Азиатско-Тихоокеанского региона. Необходимо отметить, что план развития города учитывает экономический рост и культурное раз-

образие региона и предполагает сохранение уникального речного и ландшафтного наследия при создании устойчивой городской инфраструктуры.

Интенсификация негативных природных явлений, связанных с глобальным изменением климата, оказывает разрушительное воздействие в различных регионах планеты. Вьетнам является одним из наиболее пострадавших от стихийных бедствий государств Азиатско-Тихоокеанского региона; особенно подвержены наводнениям прибрежные города, такие как Хошимин, Тайбинь, Намдинь и дельта Меконга. В последние годы затопления каждый раз, когда происходят прилив или сброс воды из водохранилищ, расположенных выше по течению, становятся все более серьезными, многие районы затопляются на много дней, что сильно влияет на транспорт, жизнь людей в крупнейшем городе Вьетнама (рис. 2). В 2010 г. Хошимин вошел в десятку городов мира, которые наиболее сильно страдают от изменения климата [1–5]. Однако, согласно планам развития главной провинции страны, о которых говорилось выше, прогнозируется, что к 2070 г. Хошимин войдет в пятерку лучших городов мира [6, 7].

В 2016 г. после продолжительных исследований и рекомендаций отечественных и зарубежных экспертов, согласно решению премьер-министра № 1547/QĐ-TTg, в г. Хошимин приступили к реализации мегапроекта по строительству противопаводковых сооружений, включая 6 шлюзов для защиты от наводнений, а именно: Бен Нге, Кай Кхо, Мьонг Чуой, Фу Суан, Фу Динь и Тан Тхуан (рис. 3).

После введения в эксплуатацию гидротехнических сооружений (ГТС) участки территории за пределами шлюзов будут затоплены. Глубина затопления будет варьироваться в зависимости от топографии района. Это необходимо учитывать при планировании и реализации проектов масштабной застройки городских территорий.

Ранее проводимые исследования в значительной степени были сосредоточены на решении таких вопросов, как гидродинамические режимы потоков, качество воды, засуха, интрузия солей или отложения в эстуариях и др., но не рассматривали пробле-



Рис. 1. Городской район Тху Тхем в соответствии с текущим состоянием в 2022 г. (а) и планом развития (б)



Рис. 2. Наводнение в Хошимине



Рис. 3. Схема расположения противопаводковых сооружений (шлюзы)

мы, связанные с наводнениями [8–16]. Например, в работах Bao Thach [8], Hong Quan [9] указывалось, что на гидродинамический режим в бассейне низовьев рек Сайгон – Донгнай влияют дожди и приливы, меняется сток. В зависимости от регулирования водохранилища в верхнем течении уровень загрязнения воды на р. Сайгон более серьезный, чем на р. Донгнай, и постепенно увеличивается от верхнего течения к нижнему. Исследование Thuu Linh и соавт. [10] показывает, что в бассейне р. Донгнай в сухой сезон площадь подверженных засухе земель увеличивается в соответствии со сценариями изменения климата. Thai [11], Hoang [12], Ngoc [13], Viet [14], Phung [15], Quynh [16] оценили изменения объемов стока и уровней паводковых вод в бассейне рек Сайгон – Донгнай при изменении морского климата по множеству различных сценариев. Dinh [17] и Tuan [18] пришли к выводу, что Хошимин подвергается большому риску затопления из-за приливов, проливных дождей и увеличения стока из водохранилища Зау Тиенг. Marcello Gugliotta [19] изучали распределение, состав и размер частиц наносов на последних 50 км речной системы Сайгон – Донгнай до устья.

После строительства ГТС для защиты от наводнений опубликовано несколько научных исследований. Можно упомянуть работу Нгуена и Биня [20], где отражено, что при одновременном наступлении пика в сезон дождей и повышении уровня прилива система не может гарантировать уровень воды $\leq 1,2$ м. Между тем Хай [21] утверждает, что факторы урбанизации и строительства противопаводковых сооружений сильно влияют на режим интрузии солей в нижнем течении рек Сайгон – Донгнай.

Таким образом, предыдущие исследования либо не учитывали влияние противопаводковых сооружений, либо учитывали, но не оценивали глуби-

ну и площадь затопления на тех же пострадавших участках при реализации строительных проектов.

Данное исследование направлено на определение глубины и площади затопления при работе противопаводковых шлюзов при различных сценариях сброса паводка и повышения уровня моря, а также обоснование и установление контрольных строительных отметок, необходимых для территориального планирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Областью исследования является район нижнего течения рек Сайгон – Донгнай, где расположен г. Хошимин. Этот район граничит с дельтой Меконга на западе и Восточным морем на юго-востоке. На речной сток в районе исследования непосредственное влияние оказывает работа двух водохранилищ Зау Тиенг и Чи Ан, расположенных выше по течению (рис. 4).

В настоящей работе программные комплексы MIKE 11, MIKE 21 и MIKE FLOOD использовались



Рис. 4. Нижнее течение рек Сайгон – Донгнай

для оценки влияния водохранилищ и противопаводковых сооружений на уровень воды в нижнем течении реки Сайгон – Донгнай.

Описание модели MIKE 11

MIKE 11 — передовой гидравлический информационный инструмент, профессиональный инженерный пакет программ для моделирования одномерных течений в эстуариях, реках, ирригационных системах, каналах и других водоемах¹. Гидродинамическая (HD) модель способна моделировать одномерный нестационарный поток в сети рек с использованием гидродинамического волнового подхода. Модуль MIKE 11 HD решает вертикально интегрированные уравнения сохранения неразрывности и импульса, т.е. систему уравнений Сен-Венана. Пять основных входных параметров, которые должны быть указаны для установки MIKE 11(HD), — это план речной сети, сечения, граничные условия, гидродинамические параметры и параметры моделирования. Сеть рек и каналов в районе исследования в MIKE 11 показана на рис. 5.

Описание модели MIKE 21

MIKE 21 — это двухмерная компьютерная система моделирования эстуариев, прибрежных вод и морей. Это профессиональный инженерный программный пакет для моделирования течений, уровней воды, волн, наносов, переноса загрязняющих веществ и качества воды [22]. MIKE 21 HD моделирует двухмерные течения со свободной поверхностью, где расслоением можно пренебречь. Она является базовым модулем всей системы MIKE 21 и обеспечивает гидродинамическую основу для расчетов, выполняемых в большинстве других модулей, например в модулях «Адвекция-Рассеяние», «Качество воды» и «Перенос наносов» [23, 24]. Входными данными модели Mike 21 является цифровая карта высот изучаемой территории LiDAR-DEM с разрешением 30 × 30 м. Карта цифровой модели рельефа (ЦМР) обрабатывается инструментом Mesh Generator для создания файла батиметрии, который затем вводится в модуль Mike 21HD, как представлено на рис. 6.

Речная сеть MIKE 11 была подключена к батиметрии Mike 21 с использованием опции боковой связи, доступной в MIKE FLOOD [25, 26]. Степень затопления и глубина поймы для избыточной воды рассчитывается с использованием MIKE 21. Другие параметры для левого и правого береговых отводов, такие как коэффициент импульса, коэффициент водослива и коэффициент допустимой глубины, сохраняются со значениями по умолчанию. Период моделирования для MIKE 11 и MIKE 21 остался прежним, а временной шаг модели был скорректирован до низкого значения 30 с, чтобы число

¹ DHI – MIKE 11. River and Canal Modeling System: Reference Manual. 2007.

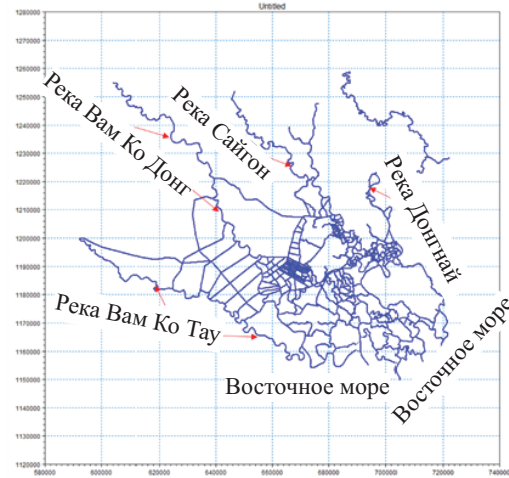


Рис. 5. Сеть рек и каналов в нижнем течении рек Сайгон – Донгнай в MIKE 11

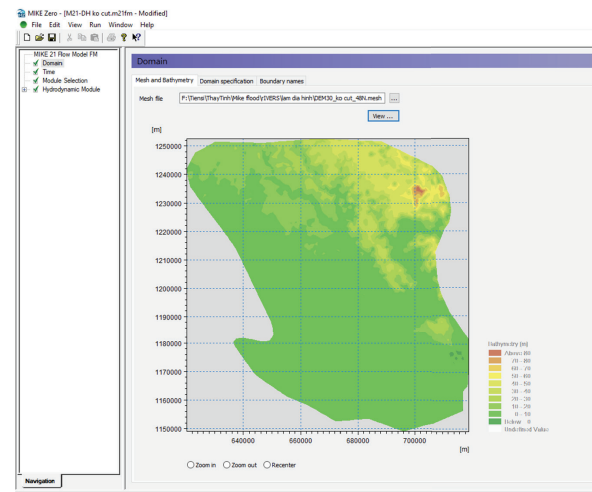


Рис. 6. Топография территории в нижнем течении рек Сайгон – Донгнай в MIKE 21

Куранта (CR) было меньше или равно 1 для достижения стабильного MIKE FLOOD. Симуляция работает без ошибок. Установка Mike FLOOD с рекой (MIKE 11) и обоими боковыми связями (MIKE 21) показана на рис. 7.

Целью данного исследования является определение глубины и площади территорий, которые будут затоплены при работе противопаводковых шлюзов при сценариях сброса паводка вверх по течению и подъема уровня моря. Поэтому сценарии моделирования настроены в соответствии с объемом стока двух водохранилищ Зау Тиенг и Чи Ан в 2020, 2000 гг., когда один раз в 100 лет происходит наводнение. При этом соответствующий уровень воды в 2020, 2000 гг. и исторический максимальный уровень воды на станции Вунг Тай также используются в качестве входной границы ниже по течению для модели MIKE (табл. 1).

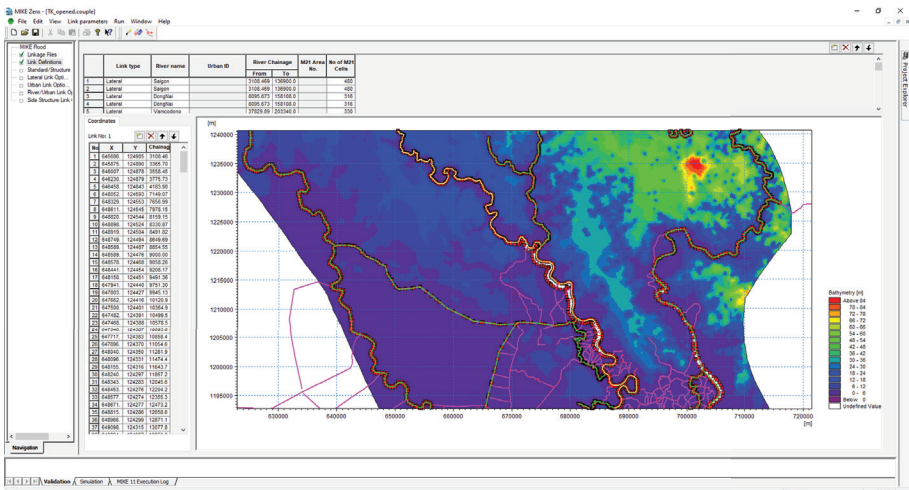


Рис. 7. Схема подключения MIKE 11 и MIKE 21 в MIKE FLOOD

Табл. 1. Сценарии численного моделирования

Сценарии	Описание граничного условия
1	Вверх по течению: расход 2020 г. Вниз по течению: уровень приливов на измерительной станции Вунг Тай
2	Вверх по течению: расход 2000 г. Вниз по течению: уровень приливов на измерительной станции Вунг Тай
3	Вверх по течению: $Q_{\text{макс}}$ при $P = 1 \%$. Вниз по течению: самый высокий уровень прилива измерительной станции Вунг Тай

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Калибровка и проверка модели

Модель откалибрована по фактическим данным, измеренным на гидрологических станциях с 1 октября 2012 г. по 31 декабря 2012 г. Коэффициенты Маннинга (Manning) и начальные уровни воды в реках скорректированы на разницу между моделируемыми и реальными уровнями воды, измеренными на низших 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 г. показаны на рис. 8. Можно увидеть хорошее соответствие между смоделированными и наблюдаемыми уровнями воды в разные периоды времени.

Коэффициент детерминации R^2 и эффективность Нэша – Сатклиффа (NSE) использовались для проверки пригодности и производительности модели перед запуском моделирования сценариев и прогнозов [27, 28]. Коэффициент R^2 показывает линейные отношения между измеренными значениями и моделированием модели, в то время как NSE измеряет степень наблюдаемой изменчивости, объясненной моделированием. NSE обычно используется для проверки модели в гидрологии. Когда значение R^2 приближается к 1, а NSE равно 1, считается, что модель работает с максимальным уровнем достоверности [28, 29].

Коэффициент детерминации:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \overline{Q_o})(Q_{s,i} - \overline{Q_s}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \overline{Q_o})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \overline{Q_s})^2}, \tag{1}$$

где n — общее количество измеренных или смоделированных значений; $Q_{o,i}$ — измеренные значения; $\overline{Q_o}$ — средние измеренные значения; $Q_{s,i}$ — моделируемые значения; $\overline{Q_s}$ — средние смоделированные значения.

Коэффициент эффективности Нэша – Сатклиффа (NSE):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \overline{Q_o})^2}, \tag{2}$$

NSE может варьироваться от $-\infty$ до 1, где 1 указывает на лучшую производительность.

Значения NSE для почасовой калибровки и проверки на всех станциях приведены в табл. 2. Коэффициенты R^2 и NSE показывают, что модель обладает высокой надежностью при моделировании потока ниже по течению рек Сайгон – Донгнай.

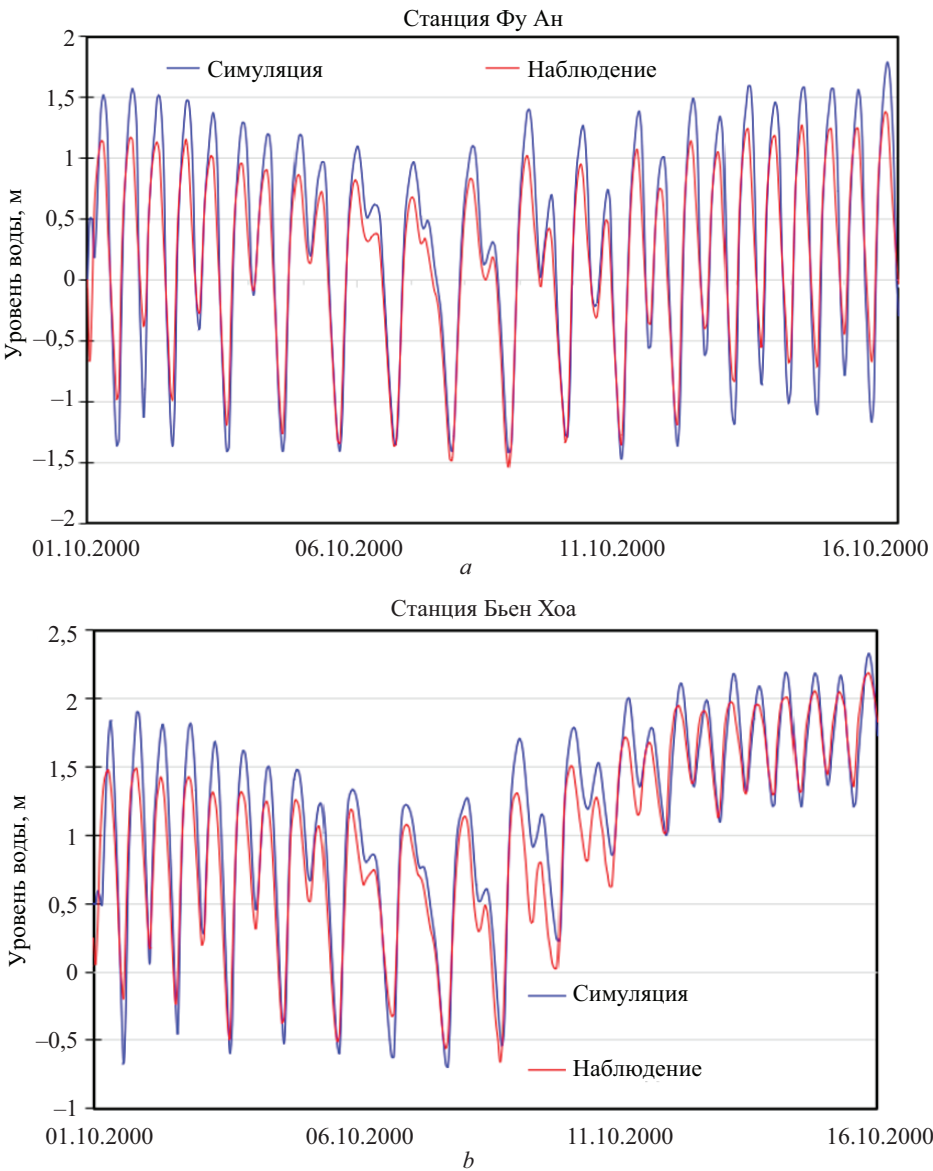


Рис. 8. График сравнения наблюдаемого и смоделированного уровня воды на станциях Фу Ан, Бьен Хоа

Табл. 2. Производительность MIKE 11 для моделирования уровня воды

Станция	Калибровка		Проверка	
	(01.10.2012 – 31.12.2012)		(01.10.2000 – 16.10.2000)	
	R^2	E_f	R^2	E_f
Бьен Хоа	0,95	0,81	0,93	0,87
Фу Ан	0,97	0,86	0,96	0,81

Результаты

Результаты расчетов модели MIKE FLOOD представляют собой двухмерную карту затопленных территорий с разной глубиной затопления, представленную цветными слоями, как показано на рис. 9.

При расчетном сценарии на 2020 г., когда нет большого наводнения на участках в верхнем течении, Хошимин и прилегающие провинции затопляются из-за приливов, особое внимание уделяется районам с низинами, расположенным по обеим сторонам реки, таким как районы Нхя Бе, Кангио,

города Хошимина, коммун Фудонг, Фухуу и Фуок-хань района Нхон Трач, провинция Донгнай, района 12 округа Хошимина, расположенного между реками Вамтхуат и Сайгон, даже районов Танан и Тхутуа в Лонге. Провинция также была затоплена приливами. Однако затоплены эти участки с небольшой глубиной около 0,4–0,6 м. В частности, в 12-м районе территория была затоплена более сильно, средняя глубина затопления составила 0,7–1 м. По тому же сценарию в 2020 г., после сооружения противопаводковых шлюзов, территория района

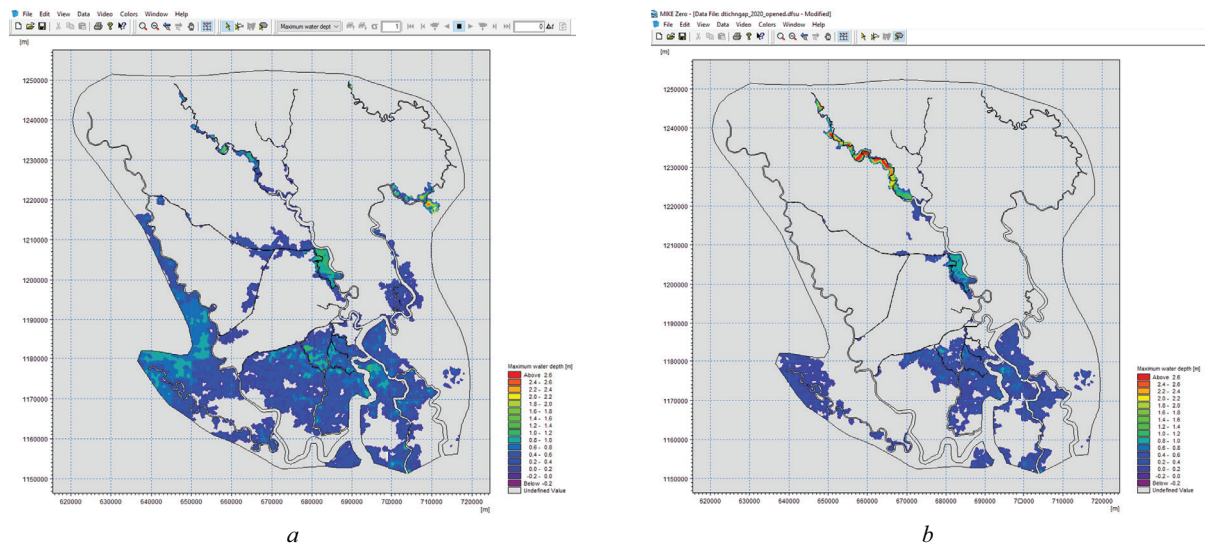


Рис. 9. Карта паводкового затопления нижнего течения рек Сайгон – Донгнай без противопаводковых шлюзов в 2000 г. (a) и в 2020 г. (b)

Нябе, часть, примыкающая к району 7, защищена от затопления, остальные районы не подвержены значительному изменению (рис. 10).

В верховьях возникали большие наводнения, такие как историческое наводнение 2000 г. (сценарий 2) и наводнение с частотой $P = 1\%$ (сценарий 3) в сочетании с высоким уровнем прилива, что привело к затоплению территории, при этом значительно увеличилась и глубина затопления (рис. 11, 12).

Анализ результатов моделирования позволил выявить общие признаки, которые отражены в двух сценариях: более сильные наводнения происходят на участке рек в верхнем течении; значительно увеличивается площадь затопления в районах Нха Бе и Кангио г. Хошимин, в провинции Лонг Ан, в районе Нхонтрач и провинции Донгнай. При исследовании затопленных участков, расположенных в нижнем течении рек, необходимо также учитывать морские приливы.

Максимальная глубина затопления достигается в период, когда осуществляется сброс воды из водохранилищ, а в низовьях наблюдается прилив (или приливной пик). Из-за низких отметок затопляемых территорий и сложной обширной речной сети с множеством каналов при встрече паводкового и приливного течений уровень воды в реках и каналах резко повышается, вода выходит из берегов и затопляет территории. В районах, расположенных выше по течению, таких как Там Ан в провинции Донгнай, Лонг Фуок, Чьонг Тхань, Лонг Чьонг, Тху Тим, Тхао Дьен и Ан Фу в районе 2, территории также сильно затоплены. Наводнению подвергаются особо важные экономические и густонаселенные районы, такие как район 2, город Тху Дык, район 8.

В сценарии 2 районы Бинь Чан, Нха Бе и Кан Зо имеют максимальную глубину затопления от 0,6 до 0,8 м, особенно в области коммуны Фонг Фу, район Ня Бе, глубина составляет 1,2–1,3 м; районы Бинь

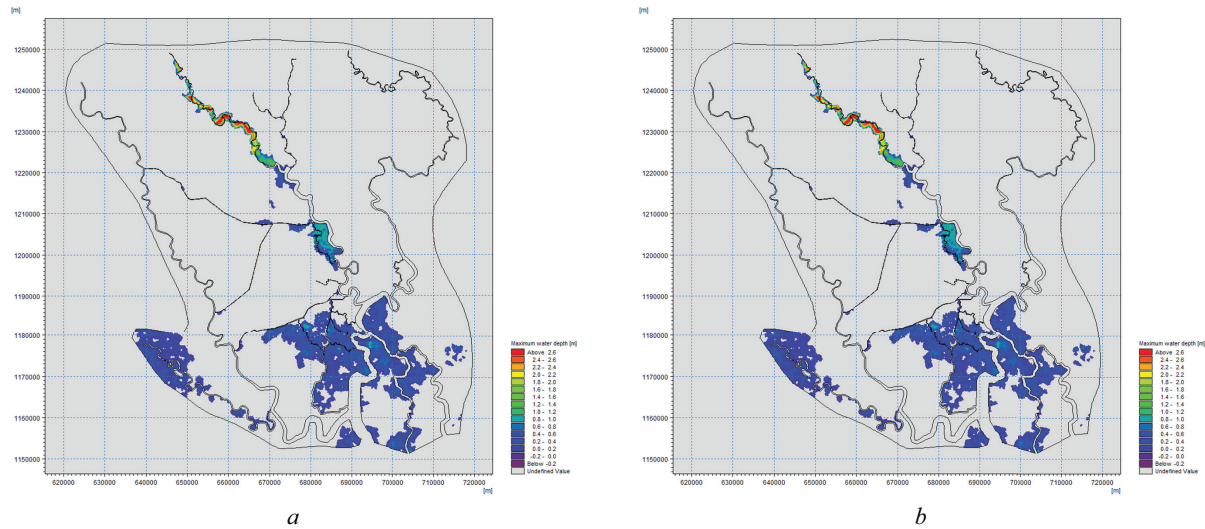


Рис. 10. Затопленные территории по расчетному сценарию на 2020 г. без шлюзов (a) и со шлюзами (b)

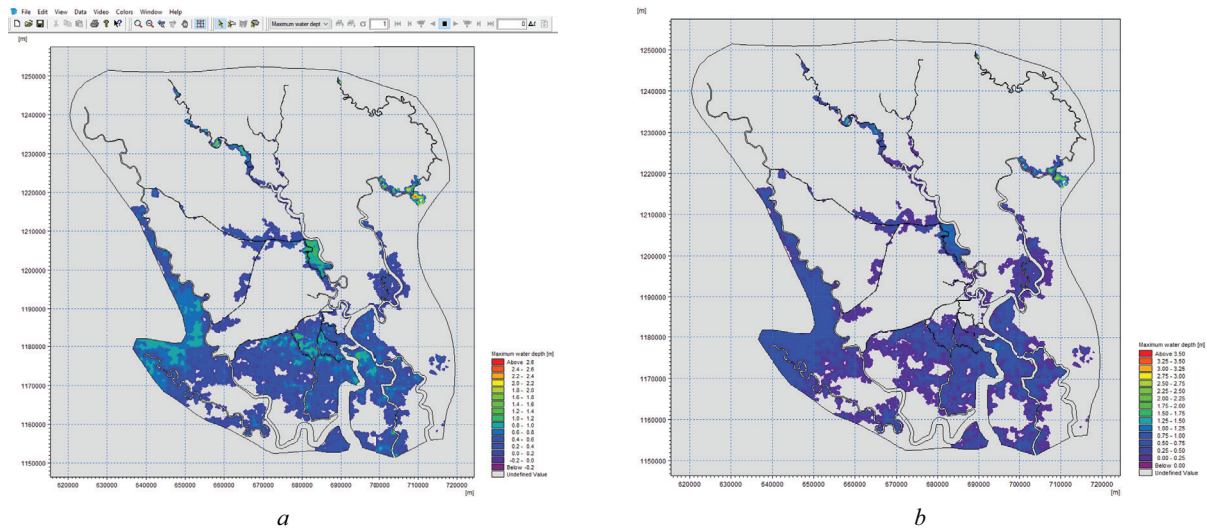


Рис. 11. Карта паводкового затопления по расчетному сценарию на 2000 г. без шлюзов (а) и со шлюзами (b)

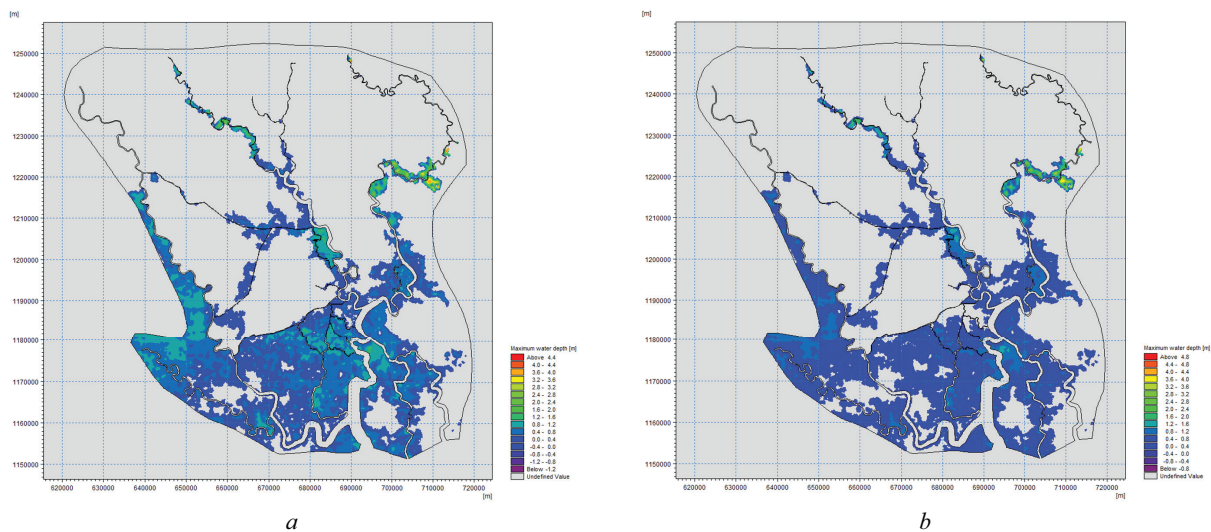


Рис. 12. Карта затопления паводком по сценарию возникновения паводка с $P = 1\%$ без шлюзов (а) и со шлюзами (b)

Кхань, Кан Зо затоплены примерно на 1 м, район Кан Зуок, провинция Лонг Ан, менее чем на 0,3–0,4 м, но район Мок Хоа, Тхань Хоа, Дук Хюэ граничит с дельтой р. Меконг и Камбоджей, глубина которой превышает 0,7–0,9 м. Верхние районы, такие как Тху Тьем, Бинь Тхань и Тху Дык, почти не затопляются. Только районы Лонг Фьюк и Там Ан были затоплены на 0,2–0,3 м, в основном на полях вдоль р. Донгнай и в районе между реками Донгнай и Так. Между тем территория района 12, расположенная между реками Сайгон и Вам Тхуат, является густонаселенным местом с населением по состоянию на 2019 г. 620 146 чел., плотность населения 11 759 чел/км², наиболее подвержена затоплению с глубиной от 0,9–1,1 до 1,25 м. Поэтому необходимо предусмотреть в ближайшее время строительство инженерной системы ГТС для защиты территорий от затопления.

При эксплуатации противопаводковых шлюзов центральные районы Хошимина, такие как 1, 4, 7, 8, будут защищены на случай отсутствия наводнения или наводнения в верхнем течении рек, как и в 2000 г.

(рис. 10, b, 11, b). Однако в случае наводнения, которое происходит один раз в 100 лет, как в сценарии 3, способность защитить внутригородские районы противопаводковой шлюзовой системы значительно снижается: территория района 4, расположенного между двумя шлюзами Бен Нге и Тан Тхуан, была затоплена на 0,4–0,5 м; более половины площади 7-го округа, граничащего с р. Сайгон, затоплено на 0,5–0,6 м (рис. 11, b). Области, которые не затоплены в 1-м и 2-м сценариях, такие как Тху Тьем, район 2, Тху Дык, в этом сценарии будут затоплены на 0,4–0,6 м. Кроме того, район между реками Так и Донгнай будет затоплен на глубину 1–1,2 м, в некоторых местах наибольшая глубина достигает 1,4 м, а прилегающие территории затоплены на 0,5–0,6 м.

Как отмечалось ранее, именно эти районы Хошимина подлежат масштабной реконструкции и модернизации с обустройством новых городских территорий в целях создания нового делового, финансово-экономического, научно-образовательного и культурно-туристического центра Вьетнама. Сле-

Табл. 3. Площадь затопливаемого участка по $H_{\max}$, км²

$H_{\max}$, м		$H_{\max} \leq 1$ м	$1 \text{ м} < H_{\max} \leq 2 \text{ м}$	$2 \text{ м} < H_{\max} \leq 3 \text{ м}$	$H_{\max} > 3 \text{ м}$	Общая площадь, км ²	Изменение, км ²
Сценарий 1	O	612,64	16,55	13,97	4,33	647,48	–
	Z	549,06	17,32	13,97	4,33	584,68	–62,80
Сценарий 2	O	1413,32	35,54	2,48	0,15	1451,48	–
	Z	1361,66	31,98	2,52	0,17	1396,34	–55,14
Сценарий 3	O	1790,47	125,36	20,50	8,14	1944,47	–
	Z	1713,81	117,10	20,50	8,14	1859,55	–84,92

Примечание: O — когда шлюзы открыты; Z — когда шлюзы закрыты.

довательно, одной из важнейших задач является обеспечение эффективных превентивных мероприятий инженерной защиты данной территории от наводнения и затопления.

Анализ результатов расчетов по модели MIKE FLOOD также показывает, что после введения в эксплуатацию противопаводковых сооружений площадь и глубина затопления внешних территорий увеличится. Площадь территорий, подверженных затоплению, с распределением на участки по глубине затопления в нижнем течении рек Сайгон – Донгнай представлена в табл. 3.

Данные, приведенные в табл. 3, показывают, что работа противопаводковых шлюзов способствует уменьшению площади затопления во всех трех сценариях. В случае, когда основной причиной является прилив (сценарий 1), при строительстве шлюза площадь затопления $1 \text{ м} < H_{\max} \leq 2 \text{ м}$ будет увеличиваться. При сильных паводках на участках в верхнем течении, как в 2000 г. (сценарий 2), площадь затопления с глубиной $1 \text{ м} < H_{\max} \leq 2 \text{ м}$ уменьшается, а в местах с глубоким затоплением $H_{\max} > 2 \text{ м}$ увеличивается. В сценарии 3, когда паводок в верхнем течении слишком велик, противопаводковые сооружения также способствуют уменьшению площади затопления на участках с глубиной затопления $H_{\max} \leq 2 \text{ м}$ и не увеличивают площадь затопления на сильно затопляемых участках с $H_{\max} > 2 \text{ м}$.

Очевидно, что многие районы Хошимина и соседних провинций по-прежнему будут регулярно сталкиваться с риском наводнения. Поэтому наряду со строительством ГТС для защиты от наводнений и затопления необходимо разработать и реализовать превентивные инженерно-технические мероприятия по защите территории от подтоплений и затоплений и, в первую очередь, провести искусственное повышение поверхности территории до незатопляемых планировочных отметок, а также установить новые контрольные строительные отметки.

Контрольная строительная отметка — это наименьшая допустимая отметка поверхности земли, используемая при планировании территории застройки для обеспечения гарантированной защиты городских районов от затопления и подтопления. Это важный экономико-технический критерий, ко-

торый необходимо определять в градостроительных и строительно-инвестиционных проектах. Согласно Национальному техническому регламенту Вьетнама по текущему планированию строительства (QCVN 01:2021/BXD), контрольная строительная отметка рассчитывается по следующей формуле:

$$\nabla_{XD} = \nabla_{MD} + H_{\max}^{P\%} + a, \tag{3}$$

где ∇_{XD} — контрольная строительная отметка, м; ∇_{MD} — отметка земли или высота местности, м; $H_{\max}^{P\%}$ — расчетный уровень паводка, соответствующий расчетной частоте P , %; a — допустимая безопасная высота, м.

Согласно QCVN 01:2021/BXD, для городских территорий класса I, сосредоточенных жилых районов и промышленных зон, расчетная частота $P = 1 \%$, допустимая безопасная высота $a = 0,3 \text{ м}$ для гражданских земель и $a = 0,5 \text{ м}$ для промышленных земель.

Основываясь на результатах расчетов модели MIKE FLOOD по сценарию 3, отметки застройки в затопленных районах городов Хошимин, Донгнай и Лонг Ан приведены в табл. 4.

В решении 589/QD-TTg об утверждении плана застройки района Хошимина до 2020 г. и концепции развития города до 2050 г., подписанном премьер-министром 20 мая 2008 г., была определена основная контрольная строительная отметка г. Хошимин выше 2,05 м. Однако в условиях изменения климата и повышения уровня моря утвержденные ранее отметки не актуальны. Таким образом, контрольные строительные отметки для планирования городской территории, предложенные в этом исследовании, являются научно обоснованным практическим вкладом в работу агентств по планированию строительства и управлению ирригацией при формировании пакета мероприятий по защите Хошимина и соседних провинций в нижнем течении речной системы Сайгон – Донгнай в будущем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования по коэффициентам корреляции R^2 и NSE показывают, что набор моделей MIKE (MIKE 11, MIKE 21, MIKE FLOOD) возможно использовать для моделирования гидравлического режима, площади и глубины затопления

Табл. 4. Строительные отметки в районах

Районы	Строительные отметки, м
<i>Хошимин</i>	
2	+2,5
4	+2,5
7	+2,5
8	+2,5
9 (территория между реками Сайгон и Так)	+2,4
9 (территория между реками Донгнай и Так)	+2,5
12	+2,5
Бинь Тхань	+2,5
Нха Бе	+2,6
Кангио	+2,6
Бинь Чань	+2,3
<i>провинция Донгнай</i>	
Бьен Хоа	+3,0
Лонг Тхань	+2,5
Нхон Часн	+2,5
<i>провинция Лонг</i>	
Кан Зуок	+2,5
Тан Чу	+2,5
Бен Лык	+2,5

в бассейне нижнего течения рек Сайгон – Донгнай. 2D-карта наводнений указывает на то, что исследуемые районы Нха Бе, Кангио, Нхон Трач будут сталкиваться с риском частых наводнений.

Во всех сценариях противопаводковые сооружения эффективны, центральные районы Хошимина защищены, а площадь затопления уменьшена. Однако в результате работы ГТС происходит масштабное затопление внешних прилегающих территорий.

Отмечая, что противопаводковые сооружения не обеспечат гарантированную защиту территории Хошимина и прилегающих провинций от наводнений и затоплений, предложенные в работе новые контрольные строительные отметки являются существенным научным вкладом в проекты территориального планирования при создании в нижнем течении речной системы Сайгон – Донгнай крупнейшего ультрасовременного центра Азиатско-Тихоокеанского региона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Маркова И.М., Хань Ф. Оценка влияния противопаводковых сооружений на уровень воды в нижнем течении речной системы Сайгон – Донгнай // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 9. С. 1408–1421. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.9.1408-1421

2. Lasage R., Veldkamp T.I.E., de Moel H., Van T.C., Phi H.L., 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

3. Hallegatte S., Green C., 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

4. 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

5. 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.

6. Hanson S., Nicholls R., Ranger N., Hallegatte S., Corfee-Morlot J., Herweijer C. et al. A global ranking of port cities with high exposure to climate extremes // Climatic Change. 2011. Vol. 104. Issue 1. Pp. 89–111. DOI: 10.1007/s10584-010-9977-4

7. Jongman B., Ward P.J., Aerts J.K. Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes // *Global Environmental Changes*. 2012. Vol. 22. Issue 4. Pp. 823–835. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2012.07.004
8. Thach B. Hydrodynamic regime and water quality characteristics in the lower Saigon – Dong Nai river // *Journal of Hydrometeorology*. 2010. Vol. 39. Pp. 54–62.
9. Quan N.H., Thang L.V., Quan N.T. Development of a decision support system for Dau Tieng reservoir, Sai gon river basin: initial results // *Vietnam-Japan Workshop on Estuaries, Coasts and Rivers*. 2015.
10. Linh V.T., Tram V.N.Q., Dung H.M., Phuong D.N.D., Liem N.D., Nguyen L.D. et al. Meteorological and hydrological drought assessment for dong nai river basin, vietnam under climate change // *Mobile Networks and Applications*. 2021. Vol. 26. Issue 4. Pp. 1788–1800. DOI: 10.1007/s11036-021-01757-x
11. Thai T. Assessment of climate change impacts on flooding in the downstream of the Dong Nai River // *VNU Journal of Science Earth and Environmental Sciences*. 2011. Vol. 27. Pp. 25–31.
12. Hoang T.T., Binh P.A. Assessment of the change in discharge to Dau Tieng reservoir according to the climate change scenarios // *Journal of Meteorology and Hydrology*. 2020. Vol. 720. Pp. 61–77.
13. Ngoc T.A. Assessing water supply possibility of dau tieng reservoir under scenarios of inflow insufficiency by using hec-ressim // *Journal of Hydraulic Technology and Environmental Science*. 2016. Vol. 55. Pp. 25–39.
14. Viet L.V. The effect of climate change and urbanization on water level in Sai gon – Dong nai river system // *Journal of Meteorology and Hydrology*. 2016. Vol. 25. Pp. 40–55.
15. Phung N.K., Kim T.T., Bay N.T. Study of predict inflow and release of upstream reservoirs under climate change condition // *Journal of Meteorology and Hydrology*. 2016.
16. Quynh N.P., Hai D.D., Lam D.H., Trang D.T.T. Assessment of water conditionality and water level changes of Sai gon river under the impact of discovering the oil resources // *Journey of Hydraulic Science and Technology*. 2018. Vol. 44.
17. Dinh C.S., Nguyen B.D., Nguyen K.D., Nguyen V.T.V. A possible solution for flood risk mitigation in Ho Chi Minh City and the lower Sai Gon – Dong Nai River Basin // *La Houille Blanche*. 2019. Vol. 105. Issue 5–6. Pp. 114–123 DOI: 10.1051/lhb/2019034
18. Tuan L.N., Kim T.T., Phung N.K. Risks of inundation by tide in Ho Chi Minh City in the context of climate change and sea level rise // *Science and Technology Development Journal — Natural Sciences*. 2020. Vol. 2. Issue 6. Pp. 182–191. DOI: 10.32508/stdjns.v2i6.879
19. Gugliotta M., Saito Y., Ta T.K.O., Nguyen V.L., Uehara K., Tamura T. et al. Sediment distribution along the fluvial to marine transition zone of the Dong Nai River System, southern Vietnam // *Marine Geology*. 2020. Vol. 429. P. 106314. DOI: 10.1016/j.margeo.2020.106314
20. Le T.H.B., Dang D.N. Assessing the operational effectiveness of the tide control system for Ho Chi Minh city // *Hydraulic Science and Technology Journal*. 2021. Vol. 65. Pp. 1–7.
21. 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. Vol. 49. Pp. 22–30.
22. Маркова И.М., Фан Х.Х. Поле скоростей течения на участке реки Сайгон при эксплуатации противопаводковых сооружений // *Строительство: наука и образование*. 2023. Т. 13. № 2. С. 74–90. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.5
23. 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
24. Filipova V., Rana A., Singh P. Urban Flooding in Gothenburg – MIKE 21 Study // *VATTEN — Journal of Water Management and Research*. 2012. Vol. 68. Pp. 175–184.
25. Kadam P., Sen D. Flood modeling on the Adjoy River using MIKE-FLOOD // *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 2012. Vol. 18. Pp. 129–141.
26. Vidyapriya V., Ramalingam M. Flood mitigation study on the adayar river by mixing // *International Journal of Scientific and Engineering Research*. 2016. Vol. 7.
27. Attar N.F., Pham Q.B., Nowbandegani S.F., Rezaie-Balf M., Fai C.M., Ahmed A.N. et al. Enhancing the prediction accuracy of data-driven models for monthly streamflow in urmia lake basin based upon the autoregressive conditionally heteroskedastic time-series model // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Issue 2. P. 571. DOI: 10.3390/app10020571
28. Ritter A., Munoz-Carpena R. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments // *Journal of Hydrology*. 2013. Vol. 480. Pp. 33–45. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.004
29. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Lew M.V. A model evaluation guide for the systematic quantification of watershed modeling accuracy // *ASABE deal*. 2007. Vol. 50. Pp. 885–900.

Поступила в редакцию 2 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 26 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 18 января 2024 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. — идея статьи, научное руководство, формулирование концепции исследования.

Фан Хань Хань — анализ источников и литературы, построение модели, проведение работы, анализ полученных результатов, формулирование выводов по статье.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

At present, the world’s major cities are facing excessive population growth, problems of employment and social security of megacity residents, environmental protection, etc. In Vietnam, the rapid urbanization of recent decades has become an important stage of development. In 1986, the urban population of Vietnam was less than 13 million people, today more than 30 million people live in cities. Ho Chi Minh City is the largest city in Vietnam with a population of 9,166,800 as of 2021 (accounting for 9.3 per cent of Vietnam’s population), with an average population density of 4,375 people/km² (the highest in the country). Rapid population growth and high density have led to housing problems and environmental pollution. According to statistics from the United Nations Population Fund (UNFPA), more than 300,000 people in Ho Chi Minh City still live in slums. To address this problem, Ho Chi Minh City authorities, in accordance with Decision No. 4834 of the city’s People’s Committee, have declared their intention to provide new housing for more than two million people by 2030, and to carry out major reconstruction and modernization of housing and embankments along the city’s canals built before 1975.

It is planned to carry out a large-scale reconstruction and modernization of the Thu Tham district,

located in the central part of the city. The peninsula on the Sai Gon River will become a new ultramodern cultural, economic and tourist centre of Ho Chi Minh City (Fig. 1). The Ho Chi Minh City Development Concept defines the formation of a modern metropolis with a high quality of life (Decision No. 5193 of the Ho Chi Minh City People’s Committee), where it is established that by 2060 Ho Chi Minh City will become an economic and international trade centre not only for Vietnam, but also for the whole Asia-Pacific region. It should be noted that the city development plan takes into account the economic growth and cultural diversity of the region and envisages the preservation of unique river and landscape heritage while creating sustainable urban infrastructure.

The intensification of negative natural phenomena associated with global climate change is having a devastating impact in various regions of the planet. Vietnam is one of the most disaster-affected countries in the Asia-Pacific region; coastal cities such as Ho Chi Minh City, Thai Binh, Nam Dinh and the Mekong Delta are particularly prone to flooding. In recent years, flooding every time, when there is a high tide or release of water from upstream reservoirs, has become increasingly severe, with many areas flooded for many days, severely affecting transport, people’s lives in Vietnam’s largest city (Fig. 2). In 2010 Ho Chi Minh City was among the top ten cities in the world that are most severely affected by climate change [1–5]. However, according to the development plans of the country’s main province mentioned above, it is



Fig. 1. Thu Thiem urban area according to the current status in 2022 (a) and development plan (b)



Fig. 2. Flooding in Ho Chi Minh City

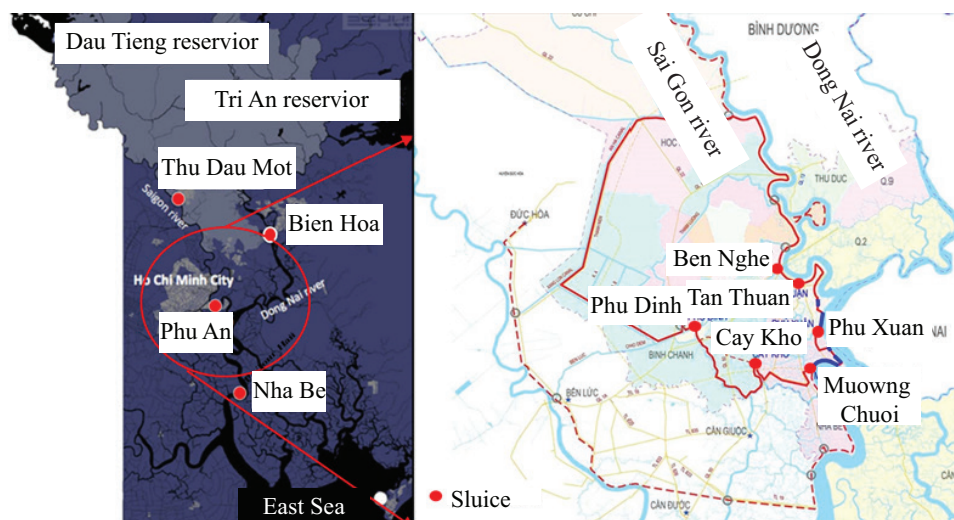


Fig. 3. Layout of flood control structures (gateways)

predicted that by 2070 Ho Chi Minh City will be among the top five cities in the world [6, 7].

In 2016, after lengthy studies and recommendations from domestic and foreign experts, in accordance with Prime Minister's Decision No. 1547/QĐ-TTg, Ho Chi Minh City launched a mega project to build flood control structures, including six flood defense gateways: Ben Nghe, Cai Kho, Muong Chuoi, Phu Xuan, Phu Dinh and Tan Thuan (Fig. 3).

Once the hydraulic structures (HS) are operational, areas of land outside the gateways will be flooded. The depth of flooding will vary depending on the topography of the area. This should be taken into account when planning and implementing large-scale urban development projects.

Earlier studies have largely focused on addressing issues such as hydrodynamic flow regimes, water quality, drought, salt intrusion or sedimentation in estuaries, etc., but have not considered flood-related problems [8–16]. For example, Bao Thach [8], Hong Quan [9] pointed out that the hydrodynamic regime in the lower Sai Gon – Dong Nai River basin is affected by rainfall and tides, and flow changes. Depending on the upstream reservoir regulation, the water pollution level of the Sai Gon River is more serious than that of the Dong Nai River and gradually increases from upstream to downstream. A study by Thuy Linh et al. [10] shows that in the Dong Nai River basin during the dry season, the area of drought-prone land increases according to climate change scenarios. Thai [11], Hoang [12], Ngoc [13], Viet [14], Phung [15], Quynh [16] estimated the changes in runoff volumes and flood water levels in the Sai Gon – Dong Nai Rivers basin under marine climate change under many different scenarios. Dinh [17] and Tuan [18] concluded that Ho Chi Minh City is at high risk of flooding due to tides, heavy rainfall and increased runoff from the Dau Tieng Reservoir. Marcello Gugliotta [19]

studied the distribution, composition and particle size of sediment loads in the last 50 km of the Sai Gon – Dong Nai rivers system up to the mouth.

After the construction of GTS for flood protection, several scientific studies were published. We can mention the work of Nguyen and Binh [20], which reflects that the system cannot guarantee the water level ≤ 1.2 m when the peak in the rainy season and the tide level rises at the same time. Meanwhile, Hai [21] argues that the factors of urbanization and construction of flood control structures strongly influence the salt intrusion regime in the lower reaches of Sai Gon – Dong Nai rivers.

Thus, previous studies either did not consider the impact of flood control structures or considered but did not estimate the depth and area of flooding in the same affected areas during construction projects.

This study aims to determine the depth and area of inundation during floodgate operation under different flood discharge and sea level rise scenarios, and to justify and establish construction control marks required for spatial planning.

MATERIALS AND METHODS

The study area is the lower reaches of the Sai Gon – Dong Nai rivers, where Ho Chi Minh City is located. This area borders the Mekong Delta to the west and the East Sea to the southeast. The river flow in the study area is directly influenced by the operation of two upstream reservoirs, Dau Tieng and Chi An (Fig. 4).

In this paper, MIKE 11, MIKE 21 and MIKE FLOOD software packages were used to assess the impact of reservoirs and flood control structures on water levels in the lower Sai Gon – Dong Nai River.

MIKE 11 model description

MIKE 11 is an advanced hydraulic information tool, a professional engineering software package for modelling one-dimensional flows in estuaries, rivers,



Fig. 4. The lower Sai Gon – Dong Nai rivers

irrigation systems, canals and other bodies of water¹. The Hydrodynamic (HD) model is capable of modelling one-dimensional unsteady flow in a network of rivers using a hydrodynamic wave approach. The MIKE 11 HD module solves the vertically integrated continuity and momentum conservation equations, i.e. the Saint-Venant system of equations. The five main input parameters to be specified for the MIKE 11(HD) setup are the river network plan, cross sections, boundary conditions, hydrodynamic parameters and modelling parameters. The river and canal network in the study area in MIKE 11 is shown in Fig. 5.

MIKE 21 model description

MIKE 21 is a two-dimensional computer modelling system for estuaries, coastal waters and seas. It is a professional engineering software package for modelling currents, water levels, waves, sediment, pollutant transport and water quality [22]. MIKE 21 HD simulates

¹ DHI – MIKE 11. River and Canal Modeling System: Reference Manual. 2007.

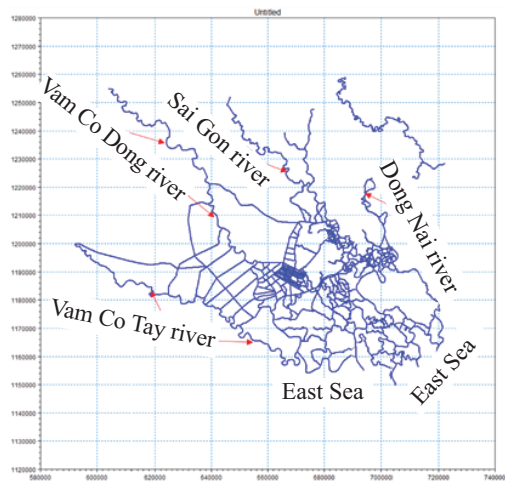


Fig. 5. Network of rivers and canals in the lower reaches of the Sai Gon – Dong Nai rivers in Mike 11

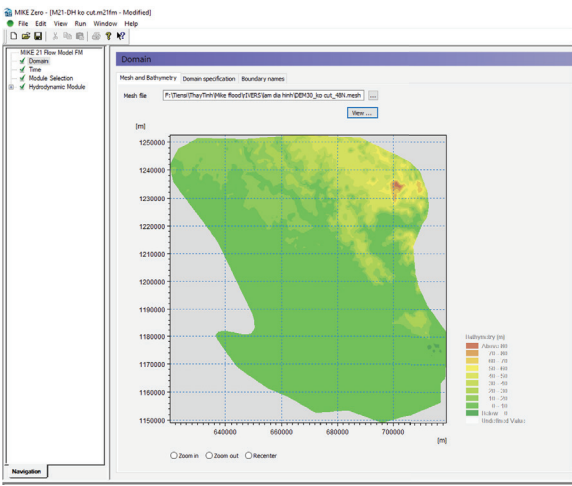


Fig. 6. Topography of the area downstream of the rivers Sai Gon – Dong Nai in MIKE 21

two-dimensional free-surface currents where stratification can be neglected. It is the basic module of the entire MIKE 21 system and provides the hydrodynamic basis for the calculations performed in most other modules, e.g. “Advection-Dispersion”, “Water Quality” and “Sediment Transport” [23, 24]. The input to the Mike 21 model is a 30 × 30 m resolution LiDAR-DEM digital elevation map of the study area. The digital elevation model (DEM) map is processed by the Mesh Generator tool to create a bathymetry file, which is then input into the Mike 21HD module, as shown in Fig. 6.

The MIKE 11 river network was connected to the Mike 21 bathymetry using the lateral link option available in MIKE FLOOD [25, 26]. The flood extent and floodplain depth for excess water is calculated using MIKE 21. Other parameters for left and right bankfull such as momentum coefficient, spillway coefficient and allowable depth coefficient are kept with default values. The simulation period for MIKE 11 and MIKE 21 remained the same and the time step of the model was adjusted to a low value of 30 s to keep the Courant number (CR) less than or equal to 1 to achieve stable MIKE FLOOD. The simulation runs without errors. The Mike FLOOD setup with the river (MIKE 11) and both lateral links (MIKE 21) is shown in Fig. 7.

The purpose of this research is to determine the depth and area of areas that will be inundated when floodgates are operated under upstream flood discharge and sea level rise scenarios. Therefore, the modelling scenarios are adjusted according to the discharge volume of the two reservoirs Dau Tieng and Tri An in 2020, 2000, when a once in 100 years flood occurs. Meanwhile, the corresponding water level in 2020, 2000 and the historical maximum water level at Vung Tau station are also used as the downstream input boundary for the MIKE model (Table 1).

RESULTS AND DISCUSSION

Calibration and model checking

The model is calibrated to actual data measured at hydrological stations from October 1, 2012 to De-

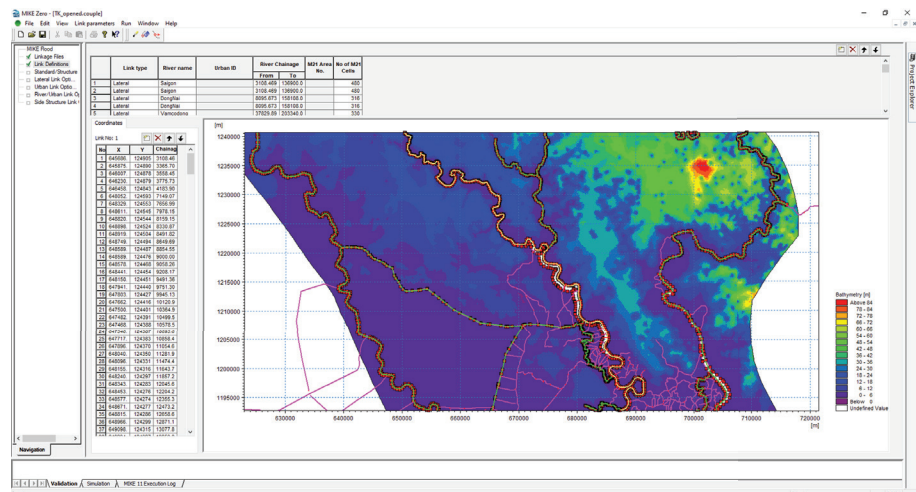


Fig. 7. Connection diagram of MIKE 11 and MIKE 21 in MIKE FLOOD

Table 1. Numerical modelling scenarios

Scenarios	Description of the boundary condition
1	Upstream: Discharge of 2020. Downstream: Tide level at Vung Tau gauge station
2	Upstream: Discharge of 2000. Downstream: Tide level at Vung Tau gauge station
3	Upstream: Q_{max} at $P = 0.1 \%$. Downstream: Highest tide level at Vung Tau gauge station

cember 31, 2012. Manning coefficients and initial river water levels are corrected for the difference between modelled and actual water levels measured at the lower stations of Thu Zau Mot, Bien Hoa, Phu An, Nha Be and Ben Luc. Hourly water levels during calibration and validation at Bien Hoa, Phu An stations from October 1, 2000 to October 16, 2000 are shown in Fig. 8. Good agreement between modelled and observed water levels at different time periods can be seen.

The coefficient of determination R^2 and the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) were used to test model fit and performance before running scenario simulations and forecasts [27, 28]. The R coefficient² shows the linear relationship between measured values and model simulation, while NSE measures the degree of observed variability explained by the modelling. NSE is commonly used for model validation in hydrology. When the R^2 value approaches 1 and the NSE is equal to 1, the model is said to be performing at its maximum confidence level [28, 29].

Coefficient of determination:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \overline{Q_o})(Q_{s,i} - \overline{Q_s}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \overline{Q_o})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \overline{Q_s})^2}, \quad (1)$$

where n is the total number of measured or modelled values; $Q_{o,i}$ — measured values; $\overline{Q_o}$ — mean measured values; $Q_{s,i}$ — modelled values; $\overline{Q_s}$ — mean modelled values.

Nash – Sutcliffe Efficiency Ratio (NSE):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \overline{Q_o})^2}, \quad (2)$$

NSE can range from $-\infty$ to 1, where 1 indicates better performance.

The NSE values for hourly calibration and validation at all stations are given in Table 2. The R^2 coefficients and NSE show that the model has high reliability in modelling the flow downstream of the Sai Gon – Dong Nai rivers.

Results

The results of the MIKE FLOOD model calculations are a two-dimensional map of flooded areas with different flood depths, represented by coloured layers as shown in Fig. 9.

In the design scenario for 2020, when there is no major flooding in upstream sections, Ho Chi Minh City and neighbouring provinces are flooded by tides, special attention is paid to low-lying areas on both sides of the river, such as Nha Be, Cangio, Ho Chi Minh City, Phu Dong, Phu Huu and Phuoc Khanh communes of Nhon Trach District, Dong Nai Province, Ho Chi Minh City District 12 located between the Vam Thuat and Sai Gon rivers, even Tanan and Thutua districts in Long. The province has also been flooded by tides. However, these areas were flooded with a shallow depth of about 0.4–0.6 metres. Particularly in District 12,

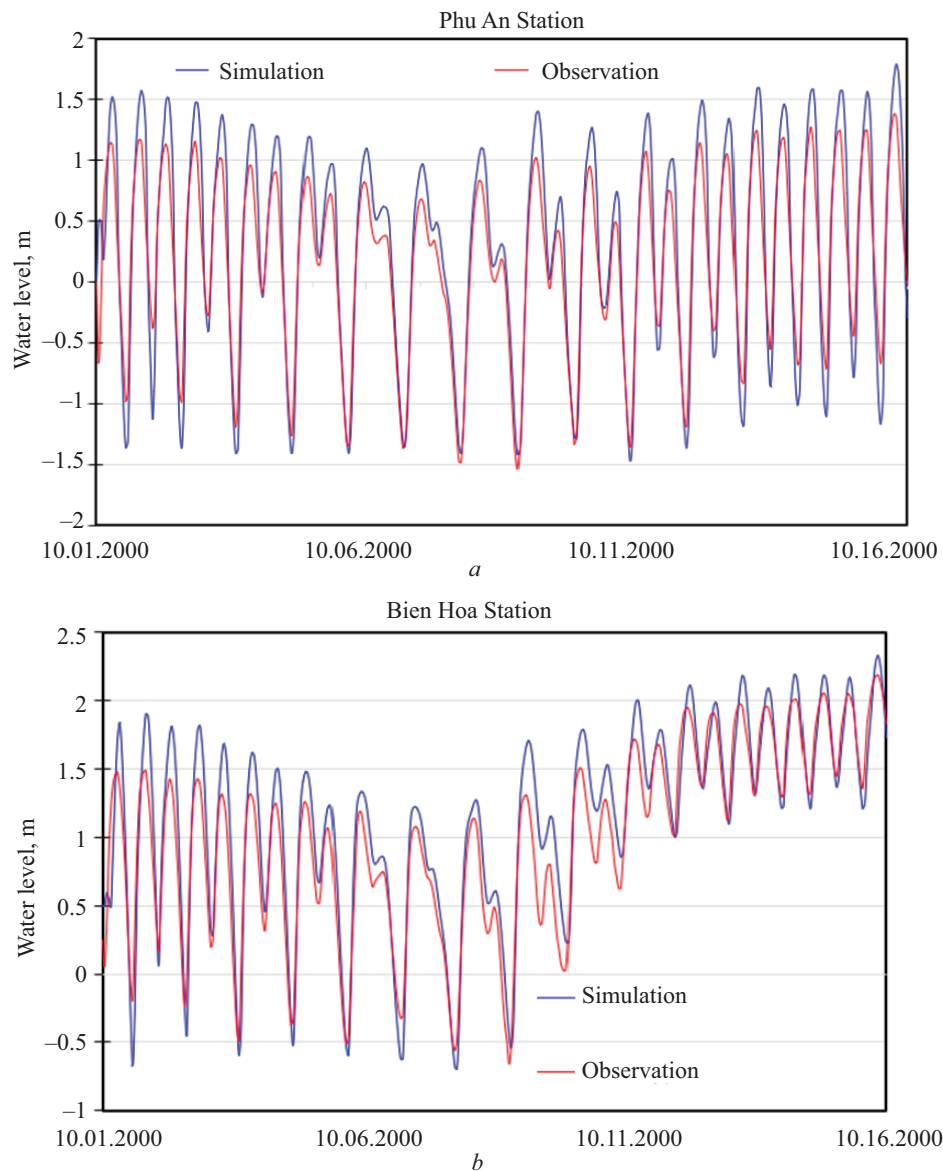


Fig. 8. Graph comparing observed and modelled water levels at Phu An and Bien Hoa stations

the area was inundated more severely, with an average inundation depth of 0.7–1 m. Under the same scenario in 2020, after the construction of flood defense floodgates, the area of Nyabe district, the part adjacent to district 7 is protected from flooding, the rest of the areas are not subject to significant change (Fig. 10).

Large floods such as the historical flood of 2000 (scenario 2) and the $P=1\%$ flood (scenario 3) combined with high tide levels occurred in the upper reaches, resulting in inundation of the area, while the depth of inundation also increased significantly (Fig. 11, 12).

The analysis of the modelling results revealed common features that are reflected in the two scenarios: more severe flooding occurs in the upstream section of rivers; the flooded area increases significantly in Nha Be and Cangiso districts of Ho Chi Minh City, Long An Province, Nhon Trach District and Dong Nai Province. Sea tides should also be taken into account when investigating flooded areas downstream of rivers.

The maximum depth of flooding is reached during the period when water is released from reservoirs and the tide (or tidal peak) occurs in the lower reaches. Due

Table 2. Performance of MIKE 11 for water level modelling

Station	Calibration		Validation	
	10.01.2012 – 12.31.2012		10.01.2000 – 10.16.2000	
	R^2	E_f	R^2	E_f
Bien Hoa	0.95	0.81	0.93	0.87
Phu An	0.97	0.86	0.96	0.81

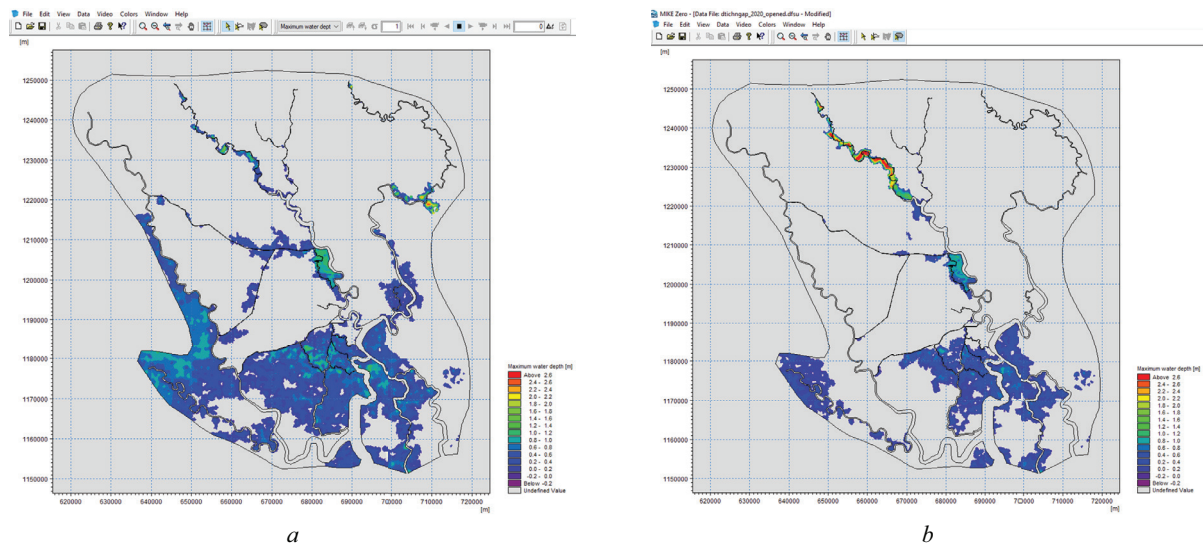


Fig. 9. Map of flood inundation of the lower reaches of the Sai Gong – Dong Nai rivers without floodgates in 2000 (a) and in 2020 (b)

to the low elevations of flooded areas and the complex extensive river network with many channels, when flood and tidal currents meet, the water level in rivers and channels rises sharply, the water overflows its banks and floods the areas. In upstream areas such as Tam An in Dong Nai Province, Long Phuoc, Truong Thanh, Long Truong, Thu Tim, Thao Dien and An Phu in District 2, areas are also severely flooded. Especially important economic and densely populated areas such as District 2, Thu Duc city, District 8 are flooded.

In Scenario 2, Binh Chanh, Nha Be and Can Zo districts have maximum inundation depth of 0.6 to 0.8 m, especially in Phong Phu commune area, Nha Be district, the depth is 1.2–1.3 m; Binh Khanh, Can Zo districts are inundated about 1 m, Can Zuoc district, Long An province, less than 0.3–0.4 m, but Moc Hoa, Thanh Hoa, Duc Hue districts border the Mekong river delta and Cambodia. Mekong and Cambodia, with depths exceeding 0.7–0.9 metres. The upper districts such as Thu Tiem, Binh Thanh and Thu Duc are hardly flooded.

Only Long Phuoc and Tam An districts were flooded by 0.2–0.3 metres, mainly in fields along the Dong Nai river and in the area between the Dong Nai and Tac rivers. Meanwhile, the area of District 12, located between the Sai Gon and Vam Thuat rivers, is a densely populated area with a population as of 2019. 620,146 people, population density of 11,759 people/km², is most prone to flooding with depths ranging from 0.9–1.1 to 1.25 metres. Therefore, it is necessary to provide for the construction of an engineering system of GTS to protect the areas from flooding in the near future.

When the floodgate system is operated, the central areas of Ho Chi Minh City, such as 1, 4, 7, 8, will be protected in case of no flooding or upstream flooding, as in 2000 (Fig. 10, b, 11, b). However, in the case of a once-in-100-year flood, as in scenario 3, the ability to protect the inner-city areas of the flood control floodgate system is significantly reduced: the area of District 4, located between the two floodgates Ben Nghe and Tan Thuan, was inundated by 0.4–0.5 m;

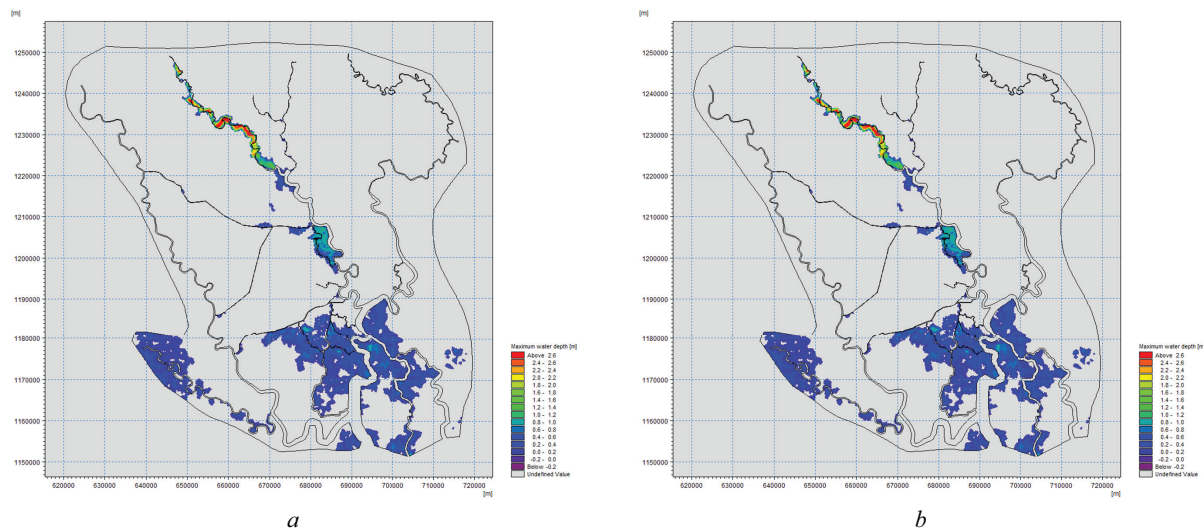


Fig. 10. Flooded areas under the design scenario for 2020 without gateways (a) and with gateways (b)

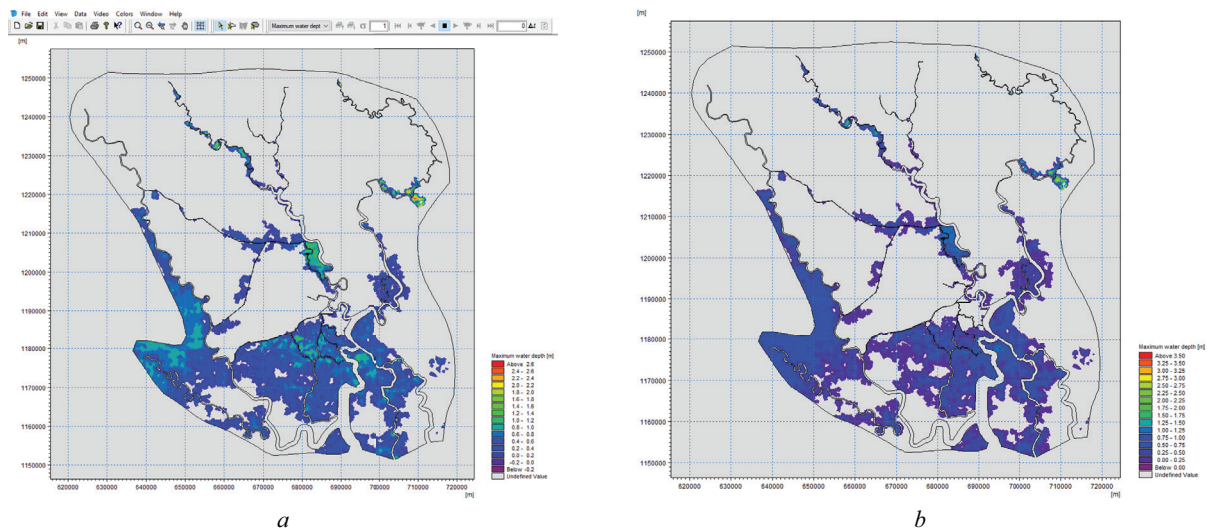


Fig. 11. Flood inundation map under the design scenario for 2000 without gateways (a) and with gateways (b)

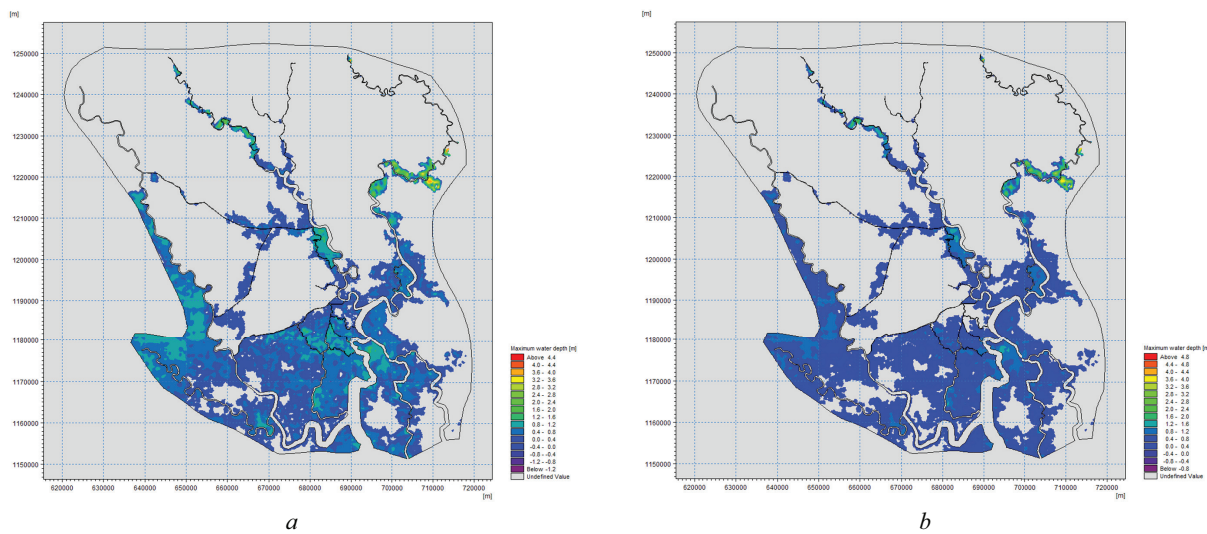


Fig. 12. Flood inundation map for the flood scenario with $P = 1\%$ without gateways (a) and with gateways (b)

more than half of the area of District 7, bordering the Sai Gon river, was inundated by 0.5–0.6 m (Fig. 11, b). Areas that are not inundated in Scenarios 1 and 2, such as Thu Thiem, District 2, Thu Duc, would be inundated by 0.4–0.6 m in this scenario. In addition, the area between the Tac and Dong Nai rivers will be flooded to a depth of 1–1.2 metres, with the greatest depth reaching 1.4 metres in some places, and adjacent areas flooded by 0.5–0.6 metres.

As noted earlier, it is these areas of Ho Chi Minh City that are subject to large-scale reconstruction and modernisation with the development of new urban areas in order to create a new business, financial and economic, scientific, educational, cultural and tourist centre of Vietnam. Therefore, one of the most important tasks is to ensure effective preventive measures of engineering protection of this territory from flooding and inundation.

The analysis of the results of the MIKE FLOOD model also shows that the area and depth of flooding of the outer areas will increase after the flood control structures are put into operation. The area of flood-

prone areas with distribution into sections by flood depth in the lower reaches of the Sai Gon – Dong Nai rivers is presented in Table 3.

The data in Table 3 show that the operation of floodgates contributes to the reduction of the flooded area in all three scenarios. In the case where the main cause is the tide (scenario 1), the flooded area $1\text{ m} < H_{\max} \leq 2\text{ m}$ will increase with the construction of the gateway. When high floods occur at upstream sites, as in 2000 (scenario 2), the inundation area $1\text{ m} < H_{\max} \leq 2\text{ m}$ decreases, and at sites with deep flooding $H_{\max} > 2\text{ m}$ increases. In scenario 3, when the upstream flood is too high, flood defences also contribute to reducing the flooded area in areas with flood depth $H_{\max} \leq 2\text{ m}$ and do not increase the flooded area in heavily flooded areas with $H_{\max} > 2\text{ m}$.

It is obvious that many areas in Ho Chi Minh City and neighbouring provinces will still face the risk of flooding on a regular basis. Therefore, along with the construction of HS for flood and inundation protection, it is necessary to develop and implement pre-

Table 3. Area of the flooded area according to $H_{\max}$, km²

$H_{\max}$, m		$H_{\max} \leq 1$ m	$1 \text{ m} < H_{\max} \leq 2$ m	$2 \text{ m} < H_{\max} \leq 3$ m	$H_{\max} > 3$ m	Total area, km ²	Change, km ²
Scenario 1 (2020)	O	612.64	16.55	13.97	4.33	647.48	–
	Z	549.06	17.32	13.97	4.33	584.68	–62.80
Scenario 2 (2000)	O	1,413.32	35.54	2.48	0.15	1,451.48	–
	Z	1,361.66	31.98	2.52	0.17	1,396.34	–55.14
Scenario 3 ($P = 1\%$)	O	1,790.47	125.36	20.50	8.14	1,944.47	–
	Z	1,713.81	117.10	20.50	8.14	1,859.55	–84.92

Notes: O — when the gateways are open; Z — when the gateways are closed.

ventive engineering measures to protect the area from waterlogging and flooding, and, first of all, to artificially raise the surface of the area to non-flooding planning levels, as well as to establish new construction control levels.

The construction reference level is the lowest permissible ground surface elevation used in the planning of the development area to ensure the guaranteed protection of urban areas from flooding and waterlogging. It is an important economic and technical criterion to be determined in urban planning and construction and investment projects. According to the Vietnamese National Technical Regulation on Current Construction Planning (QCVN 01:2021/BXD), the reference construction grade is calculated according to the following formula:

$$\nabla_{XD} = \nabla_{MD} + H_{\max}^{P\%} + a, \tag{3}$$

where ∇_{XD} — reference construction mark, m; ∇_{MD} — ground level or terrain elevation, m; $H_{\max}^{P\%}$ — design flood level corresponding to design frequency P , %; a — permissible safe height, m.

According to QCVN 01:2021/BXD, for Class I urban areas, concentrated residential areas and industrial areas, design frequency $P = 1\%$, permissible safe height $a = 0.3$ m for civil land and $a = 0.5$ m for industrial land.

Based on the results of the MIKE FLOOD model calculations under scenario 3, the building elevations in the flooded areas of Ho Chi Minh City, Dong Nai City and Long An are shown in Table 4.

Decision 589/QĐ-TTg on approving the Ho Chi Minh City District Development Plan 2020 and the City Development Concept 2050, signed by the Prime Minister on 20 May 2008, set the main reference building mark of Ho Chi Minh City above 2.05m. However, under the conditions of climate change and sea level rise, the previously approved marks are not relevant. Thus, the reference building elevations for urban area planning proposed in this study are scientifically sound practical inputs for construction planning and irrigation management agencies in formulating a package of measures to protect Ho Chi Minh City and neighbouring provinces in the lower reaches of the Sai Gon – sDong Nai rivers system in the future.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The modelling results of R^2 and NSE correlation coefficients show that the MIKE model suite (MIKE 11, MIKE 21, MIKE FLOOD) can be used to simulate the hydraulic regime, area and depth of flooding in the lower Sai Gon – Dong Nai rivers basin. The 2D flood map indicates that the study areas of Nha Be, Can-gio, Nhon Trach will face the risk of frequent flooding.

In all scenarios, the flood defenses are effective, Ho Chi Minh City’s central areas are protected and the flooded area is reduced. However, as a result of the HTS operation, large-scale flooding of the outer adjacent areas occurs.

Noting that flood control structures will not provide guaranteed protection for Ho Chi Minh City and

Table 4. Building elevations in the districts

Districts	Construction elevation, m
<i>Ho Chi Minh City</i>	
2	+2.5
4	+2.5
7	+2.5
8	+2.5
9 (area between the Sai Gon and Tac rivers)	+2.4
9 (area between the Dong Nai and Tac rivers)	+2.5
12	+2.5
Binh Thanh	+2.5
Nha Be	+2.6
Can Gio	+2.6
Binh Chanh	+2.3
<i>Dong Nai Province</i>	
Бьен Хоа	+3.0
Long Thanh	+2.5
Nhon Trach	+2.5
<i>провинция Лонг Ан</i>	
Can Giuoc	+2.5
Tan Tru	+2.5
Ben Luc	+2.5

surrounding provinces from flooding and inundation, the new construction control elevations proposed in this paper are a significant scientific contribution to spatial

planning projects in the creation of the largest ultra-modern centre of the Asia-Pacific region in the lower reaches of the Sai Gon – Dong Nai rivers system.

REFERENCES

1. Markova I.M., Khanh P. 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.).
2. Lasage R., Veldkamp T.I.E., de Moel H., Van T.C., Phi H.L., 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
3. Hallegatte S., Green C., 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
4. 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
5. 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.
6. Hanson S., Nicholls R., Ranger N., Hallegatte S., Corfee-Morlot J., Herweijer C. et al. A global ranking of port cities with high exposure to climate extremes. *Climatic Change*. 2011; 104(1):89-111. DOI: 10.1007/s10584-010-9977-4
7. Jongman B., Ward P.J., Aerts J.K. Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes. *Global Environmental Changes*. 2012; 22(4):823-835. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2012.07.004
8. Thach B. Hydrodynamic regime and water quality characteristics in the lower Saigon – Dong Nai river. *Journal of Hydrometeorology*. 2010; 39:54-62.
9. Quan N.H., Thang L.V., Quan N.T. Development of a decision support system for Dau Tieng reservoir, Sai gon river basin: initial results. *Vietnam-Japan Workshop on Estuaries, Coasts and Rivers*. 2015.
10. Linh V.T., Tram V.N.Q., Dung H.M., Phuong D.N.D., Liem N.D., Nguyen L.D. et al. Meteorological and hydrological drought assessment for Dong Nai river basin, Vietnam under climate change. *Mobile Networks and Applications*. 2021; 26(4):1788-1800. DOI: 10.1007/s11036-021-01757-x
11. Thai T. Assessment of climate change impacts on flooding in the downstream of the Dong Nai River. *VNU Journal of Science Earth and Environmental Sciences*. 2011; 27:25-31.
12. Hoang T.T., Binh P.A. Assessment of the change in discharge to Dau Tieng reservoir according to the climate change scenarios. *Journal of Meteorology and Hydrology*. 2020; 720:61-77.
13. Ngoc T.A. Assessing water supply possibility of dau tieng reservoir under scenarios of inflow insufficiency by using hec-ressim. *Journal of Hydraulic Technology and Environmental Science*. 2016; 55:25-39.
14. Viet L.V. The effect of climate change and urbanization on water level in Sai gon – Dong nai river system. *Journal of Meteorology and Hydrology*. 2016; 25:40-55.
15. Phung N.K., Kim T.T., Bay N.T. Study of predict inflow and release of upstream reservoirs under climate change condition. *Journal of Meteorology and Hydrology*. 2016.
16. Quynh N.P., Hai D.D., Lam D.H., Trang D.T.T. Assessment of water conditionality and water level changes of Sai gon river under the impact of discovering the oil resources. *Journey of Hydraulic Science and Technology*. 2018; 44.
17. Dinh C.S., Nguyen B.D., Nguyen K.D., Nguyen V.T.V. A possible solution for flood risk mitigation in Ho Chi Minh City and the lower Sai Gon – Dong Nai River Basin. *La Houille Blanche*. 2019; 105(5-6):114-123. DOI: 10.1051/lhb/2019034
18. Tuan L.N., Kim T.T., Phung N.K. Risks of inundation by tide in Ho Chi Minh City in the context of climate change and sea level rise. *Science and Technology Development Journal — Natural Sciences*. 2020; 2(6):182-191. DOI: 10.32508/stdjns.v2i6.879
19. Gugliotta M., Saito Y., Ta T.K.O., Nguyen V.L., Uehara K., Tamura T. et al. *Sediment distribution along the fluvial to marine transition zone of the Dong Nai River System, southern Vietnam. Marine Geology*. 2020; 429:106314. DOI: 10.1016/j.margeo.2020.106314
20. Le T.H.B., Dang D.N. Assessing the operational effectiveness of the tide control system for Ho Chi Minh city. *Hydraulic Science and Technology Journal*. 2021; 65:1-7.
21. 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; 49:22-30.
22. Markova I.M., Khanh P.Kh. Flow velocity field of the Saigon River section during operation of flood control structures. *Construction: Science and Education*. 2023; 13(2):74-90. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.5 (rus.).
23. Shrestha A., Bhattacharjee L., Baral S., Thakur B., Joshi N., Kalra A. et al. Understanding Suit-

ability of MIKE 21 and HEC-RAS for 2D Floodplain Modeling. *World Environmental and Water Resources Congress 2020*. 2020. DOI: 10.1061/9780784482971.024

24. Filipova V., Rana A., Singh P. Urban Flooding in Gothenburg – MIKE 21 Study. *VATTEN — Journal of Water Management and Research*. 2012; 68:175-184.

25. Kadam P., Sen D. Flood modeling on the Ad-joy River using MIKE-FLOOD. *ISH Journal of Hydraul-ic Engineering*. 2012; 18:129-141.

26. Vidyapriya V., Ramalingam M. Flood mitiga-tion study on the adayar river by mixing. *International Journal of Scientific and Engineering Research*. 2016; 7.

27. Attar N.F., Pham Q.B., Nowbandegani S.F., Rezaie-Balf M., Fai C.M., Ahmed A.N. et al. Enhanc-

ing the prediction accuracy of data-driven models for monthly streamflow in urmia lake basin based upon the autoregressive conditionally heteroskedastic time-series model. *Applied Sciences*. 2020; 10(2):571. DOI: 10.3390/app10020571

28. Ritter A., Munoz-Carpena R. Performance evaluation of hydrological models: Statistical signifi-cance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assess-ments. *Journal of Hydrology*. 2013; 480:33-45. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.004

29. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Lew M.V. A mo-del evaluation guide for the systematic quantification of watershed modeling accuracy. *ASABE deal*. 2007; 50:885-900.

Received September 2, 2023.

Adopted in revised form on December 26, 2023.

Approved for publication on January 18, 2024.

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 — idea of the article, scientific guidance, formulation of the research concept.

Phan Khanh Khanh — analysis of sources and literature, building a model, conducting work, analyzing the results obtained, formulating conclusions on the article.

The authors declare no conflict of interest.