

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 626.01:627.01:627.4:556

DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.5

## Поле скоростей течения на участке реки Сайгон при эксплуатации противопаводковых сооружений

Ирина Михайловна Маркова, Фан Хань Хань

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Крупнейший экономический центр Вьетнама — Хошимин сталкивается с размывом берегов реки, одной из основных причин которой является сток. В данном исследовании поле скоростей потока на участке р. Сайгон анализируется в разные периоды времени.

**Материалы и методы.** Сведения о расходе, уровне воды, топографии речной сети и русла реки были собраны для настройки имитационных моделей в программах MIKE 11 и MIKE 21. Эти программы служат основными инструментами, используемыми в исследовании.

**Результаты.** Величина скорости течения в середине реки в 3–4 раза больше, чем на двух берегах. Однако в период между приливом и отливом течение по обеим сторонам реки имеет более высокую скорость, чем основной поток, особенно в верхней части извилистых берегов, таких как часть реки от шлюза Бен Нге до шлюза Тан Тхуан и участок реки от полицейской станции Ан Лой Донг до моста Тху Тиен 2. Значения скорости на исследуемом участке реки в большинстве случаев превышают допустимые значения безэррозионной скорости частиц руслового материала, берегов рек, а также частиц взвешенных наносов. При эксплуатации противопаводковых шлюзов несколько снизится величина скорости потока, а также возникнут водовороты перед шлюзами.

**Выводы.** Программное обеспечение MIKE 11 и MIKE 21 детализировало распределение стока в р. Сайгон. Скорость течения на р. Сайгон имеет сложное распределение и меняется от периода к периоду в зависимости от паводкового стока из водохранилища Зау Тиенг и приливно-отливных течений Восточного моря. Процесс размыва по обеим сторонам реки будет происходить регулярно и непрерывно, поэтому необходимо срочно принять меры по защите берега реки.

**Ключевые слова:** гидroteхнические противопаводковые сооружения, река Сайгон, водохранилище Зау Тиенг, поле скорости течения

**Для цитирования:** Маркова И.М., Фан Хань Хань. Поле скоростей течения на участке реки Сайгон при эксплуатации противопаводковых сооружений // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 2. Ст. 5. URL: <http://nsr-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.5

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

## Flow velocity field of the Saigon River section during operation of flood control structures

Irina M. Markova, Phan Khanh Khanh

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

### ABSTRACT

**Introduction.** Vietnam's largest economic centre, Ho Chi Minh City, is facing riverbank erosion, one of the main causes of which is runoff. In this study, the flow velocity field of the Saigon River section is analyzed in different time periods.

**Materials and methods.** Data on discharge, water level, river network topography and river channel were collected to set up simulation models in the programmes MIKE 11 and MIKE 21. These programmes are the main tools used in the study.

**Results.** The current velocity in the middle of the river is 3–4 times higher than on the two banks. However, during the period between high and low tide, the current on both sides of the river has higher speed than the main stream, especially in the upper part of the winding banks, such as the part of the river from Ben Nghe sluice to Tan Thuan sluice and the section of the river from An Loi Dong police station to Thu Thiem 2 bridge. The velocity values in the studied river section in most cases exceed the allowable erosion-free velocity values of particles of channel material, river banks, and suspended sediment particles. The operation of the flood control sluices will slightly reduce the flow velocity values and also cause whirlpools in front of the sluices.

**Conclusions.** The MIKE 11 and MIKE 21 software detailed the flow distribution of the Saigon River. The flow velocity on the Saigon River has a complex distribution and varies from period to period depending on the flood discharge from the Dau Tieng Reservoir and the tidal currents of the East Sea. The process of erosion on both sides of the river will occur regularly and continuously, so urgent measures are needed to protect the riverbank.

**KEYWORDS:** hydraulic flood control structures, Saigon River, Dau Tieng Reservoir, flow velocity field

**FOR CITATION:** Markova I.M., Phan Khanh Khanh. Flow velocity field of the Saigon River section during operation of flood control structures. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(2):5. URL: <http://nsjournal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.5

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

## ВВЕДЕНИЕ

Реки — это естественные потоки на поверхности континента, питаемые дождевыми, подземными и талыми водами [1–3]. Реки играют роль переноса воды в гидрологическом цикле бассейна и в то же время представляют собой характеристики водной безопасности, экологии и окружающей среды района, города или страны [4–7]. Поддержание стабильности речного стока — актуальный вопрос для обеспечения жизнедеятельности и производственного процесса людей, проживающих по обе стороны реки.

Река Сайгон берет начало в невысоких холмах, с относительной высотой около 150 м в провинции Бинь Фьюк, протекает через озеро Зу Тиенг (Тай Нинь), через провинцию Бинь Зыонг и далее в Сай Гон [8, 9]. На перекрестке Красного Мыса р. Сайгон соединяется с р. Донг Най, образуя речную систему Сайгон – Донг Най, а затем впадает в море. Общая длина р. Сайгон — 256 км, из которых участок, протекающий через г. Хошимин, составляет 80 км [10].

На протяжении последних десятилетий Бинь Зыонг и Хошимин остаются ведущими экономическими центрами страны, входящими в ТОП-5 регионов с самым высоким ВВП во Вьетнаме [11, 12]. В связи с экономическим ростом этого региона нельзя не отметить роль р. Сайгон с крупнейшей по масштабам пропускной способности системой внутренних водных путей во Вьетнаме. Кроме того, Хошимин также является крупным городским районом Вьетнама с населением более 9 млн человек. Следовательно, любое изменение течения и морфологии р. Сайгон оказывает влияние на экономическое развитие, а также жизнь жителей Хошимина и провинций по обе стороны реки (рис. 1).

Существует много причин, приводящих к речным оползням, таких как: геологические характе-

ристики, добыча песка, строительство инфраструктуры, городское развитие, влияние судоходства и др., при которых гидрологический режим речного стока является одним из основных факторов, вызывающих эрозию [13–17]. Река Сайгон находится под влиянием не только течения вверх по течению, но также сильно зависит от прилива в Восточном море с полусуточным приливным режимом. Это делает гидравлический режим р. Сайгон более сложным и отличным от режима многих рек мира. Поэтому необходимо изучить и оценить изменение стока р. Сайгон.

С середины 2016 г. Хошимин начал реализацию проекта по строительству шести противопаводковых шлюзов на притоках р. Сайгон в соответствии с Постановлением премьер-министра № 1547/QD-TTg с целью защиты центрального региона от последствий изменения климата и повышения уровня моря. При проведении строительных работ важно ответить на вопрос, как это повлияет на режим стока на р. Сайгон.

Выполнены ряд исследований, посвященных противопаводковым сооружениям, а также бассейну р. Сайгон – Донг Най. Нгуен и Бинь [18] показали, что, когда осадки и пики приливов происходят в одно и то же время, защитная способность системы шлюзов для контроля приливов в Хошимине ничтожно мала. До Дац Хай [10], Фу Куинь [19] пришли к выводу о необходимости строительства противоотливных сооружений во внутренней части города. Город Хошимин обязательно повлияет на гидрорежим и качество воды в низовьях, в том числе на проблему солевого интрузива. Чувствительность к изменению климата, повышению уровня моря и землепользованию этой территории рассмотрена в работах Тран [20], Ван [21]. То Ну [22] моделирует уровень затопления и предлагает решения по противопаводковому дренажу для района



Рис. 1. Размыв на берегу р. Сайгон



Ван Тхань – Хошимин. Шонг [23], Хоанг [24] изучали последствия разгрузки нефтяного резервуара в нижнем течении р. Сайгон.

Цель настоящего исследования — проанализировать влияние потока на эрозию берегов реки через двумерное поле скорости потока с учетом воздействия сооружений защиты от наводнений. Результаты статьи станут важной научной основой для предоставления решений по предотвращению и преодолению эрозии двух берегов рек в сочетании с градостроительным планированием в современном и устойчивом направлении.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Область исследования

Для построения 2D-модели был выбран участок р. Сайгон от моста Сайгон до мыса Даймонд (отмечен красным на рис. 2). Это важный участок реки, на одном берегу которого находится политический и экономический центр Хошимина, а на другом — район Тху Тиен, который планируется превратить в экономический центр, крупнейший финансовый и международный торговый центр Вьетнама. На этом участке реки также строятся два из шести шлюзов для предотвращения наводнений, а именно Бен Нге и Тан Тхуан.



Рис. 2. Местоположение исследуемой области

### Методы исследования

В данной работе гидравлический модуль (HD) моделей MIKE 11 и MIKE 21 используется для исследования поля скорости течения на участке р. Сайгон.

MIKE 11 HD вычисляет нестационарный уровень воды и расход в реках и эстуариях, используя неявную, одномерную, конечно-разностную формулировку (полностью динамические уравнения Сен-Венана более высокого порядка), которые решаются с использованием 6-точечного метода Эббота-Ионеску [25]. Он применим к вертикально однородным потокам, начиная от крутых рек и заканчивая эстуариями, подверженными воздействию приливов и отливов. Также можно смоделировать поток через широкий спектр сооружений, таких как водосливы с широким гребнем,

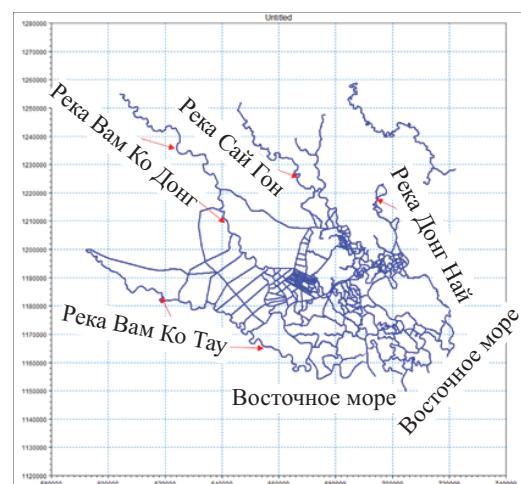


Рис. 3. Сеть рек Сайгон – Донг Най на MIKE 11

водопропускные трубы, регулирующие сооружения, мосты и определяемые пользователем сооружения.

Входные данные для модели MIKE 11 HD включают: речную сеть, параметры поперечного сечения, значения расхода уровня воды в граничных точках. Речная сеть Сайгон – Донг Най показана на рис. 3.

MIKE 21FM — это двумерная гидродинамическая модель, моделирующая уровни воды и течения в реках, эстуариях, заливах и прибрежных районах. Имитационная модель двумерного неустойчивого течения для слоя течения представлена в работах [26, 27]. Система уравнений моделирования включает уравнения неразрывности в сочетании с уравнениями импульса, описывающими изменение уровня воды и расхода. Рельеф участка р. Сайгон по модели Mike 21FM по результатам съемки авторов, выполненной в сентябре 2022 г., показан на рис. 4.

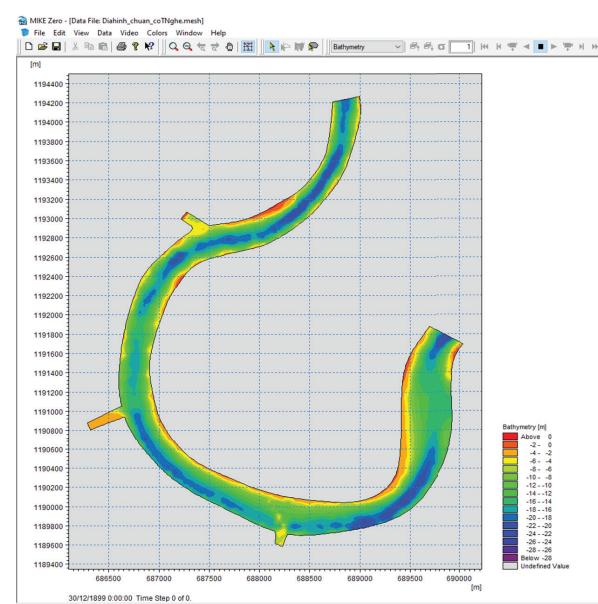


Рис. 4. Топография участка р. Сайгон от моста Сайгон до мыса Даймонд

## Сценарий расчета

В целях изучения изменения и распределения поля скорости течения на р. Сайгон при срабатывании противопаводковых шлюзов выбраны расчетные сценарии 2000 г., когда наводнение нанесло большой ущерб для дельты р. Меконг и района Сайгон – Донг Най. Паводковый расход водохранилища Зау Тиенг и уровень воды в Вунг Тай в 2000 г. показаны на рис. 5.

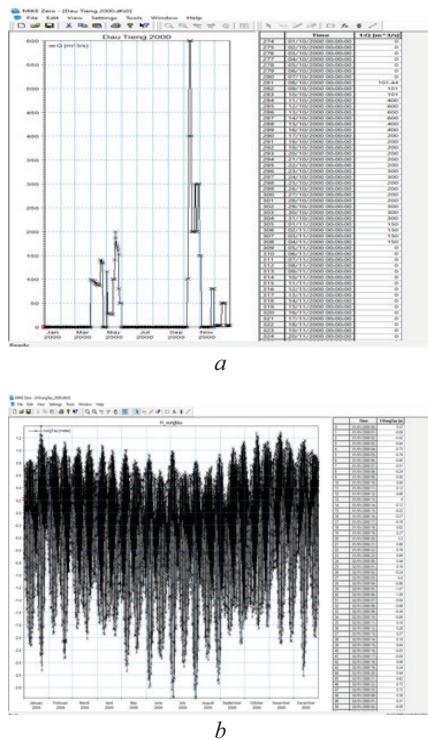


Рис. 5. Паводковый расход водохранилища Зау Тиенг (a) и уровень воды в Вунг Тай (b) в 2000 г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Калибровка и проверка модели

Модель Mike 11HD откалибрована с использованием фактических данных, измеренных на гидрологических станциях с 1 октября по 15 декабря 2010 г., и проверки на станциях Бьен Хоа, Тху Зая Мот с 1 июня по 16 июня 2009 г. Видно хорошее соответствие между смоделированными и наблюдаемыми уровнями воды в разные периоды времени.

Модель Mike 21FM была протестирована с уровнем воды на измерительной станции Фу Ан с 1 октября по 31 ноября 2013 г. (рис. 6).

Точность численных результатов оценивали с помощью коэффициента детерминации  $R^2$  и коэффициента Нэша – Сатклиффа  $E_f$  (табл.). Согласно критериям эффективности Мориаси [28], коэффициенты  $R^2$  и  $E_f$  показывают, что модель обладает высокой надежностью при моделировании потока.

Производительность Mike 11 и Mike 21 для моделирования уровня воды

Станция	Mike 11HD		Mike 21FM	
	(01.06.2009–16.09.2009)		(01.10.2013–30.11.2013)	
	$R^2$	$E_f$	$R^2$	$E_f$
Бьен Хоа	0,91	0,83	–	–
Тху Зая Мот	0,97	0,91	–	–
Фу Ан	–	–	0,98	0,96

### Результаты

Участок реки от моста Сайгон до мыса Даймонд имеет топографию, состоящую из множества извилистых участков, на течение которых влияют как паводковые потоки вверх по течению, так и приливы в Восточном море. Поэтому гидравлический

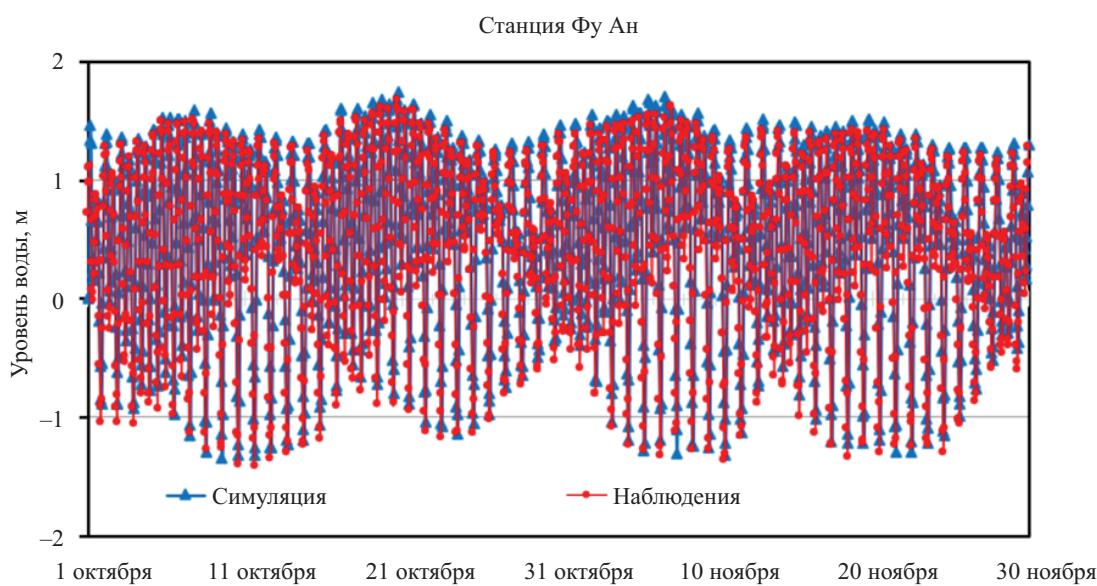


Рис. 6. Уровень воды на станции Фу Ан, временное измерение с 1 октября по 30 ноября 2013 г.

режим очень сложен при непрерывном изменении направления потока в течение суток.

*Сухой сезон, когда нет противопаводковых шлюзов*

В первые месяцы засушливого сезона водохранилище Зау Тиенг сбрасывает воду только в количестве, достаточном для орошения и повседневной жизни, поэтому на течение р. Сайгон влияет прилив Восточного моря с двумя приливами и отливами за день.

Рассматривая поле скоростей течения в период от прилива до отлива, установлено, что как в прилив, так и в отлив, поток в середине реки всегда наибольший, затем постепенно уменьшается к двум берегам. В отлив скорость течения в 2 раза больше, чем в прилив, в отлив средняя скорость в середине реки составляет около 1,6 м/с, в то время как на обоих берегах реки всего около 0,4 м/с. Однако локально в районе шлюза Тан Тuan есть место с очень высокой скоро-

прилива и начале отлива сток в реке имеет особое распределение (рис. 8). В это время основной поток на реке стремится течь вверх по течению, но по обеим сторонам реки вода течет обратно вниз по течению со скоростью, в 2–3 раза превышающей скорость основного течения. Помимо того, что в месте примерно в 1 км от мыса Даймонд появляются вихревые течения, еще и скорость в районе водоворота невелика, всего около 0,1–0,2 м/с.

В пиковые месяцы засушливого сезона (апрель и май) водохранилище Зау Тиенг сбрасывает большие объемы воды, что приводит к сильному изменению распределения скорости потока. В первое время при новом приливе одновременно с течением вверх по течению формируется распределение скорости в двух направлениях, как показано на рис. 9. Среднеречным течением называется течение вверх по течению в низовья стороны реки — это прилив, текущий вверх по течению. На некоторых криволинейных участках реки восходящий поток течет близко к берегу, а на удалении от мыса Алмазный все еще наблюдаются вихревые течения с максимальной скоростью около 0,4 м/с. В целом в это время скорость течения не слишком велика.

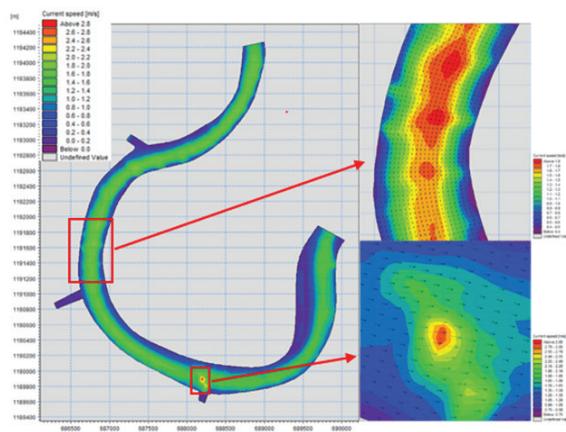


Рис. 7. Поле скорости течения на участке р. Сайгон во время отлива

стью ( $V_{\max} = 2,96$  м/с), это хорошо видно на рис. 7.

Во время прилива средняя скорость течения в середине реки составляет около 0,7 м/с, а по обеим сторонам реки — всего около 0,3 м/с. Район шлюза Тан Тuan по-прежнему остается местом с самым сильным течением. Кроме того, в конце периода

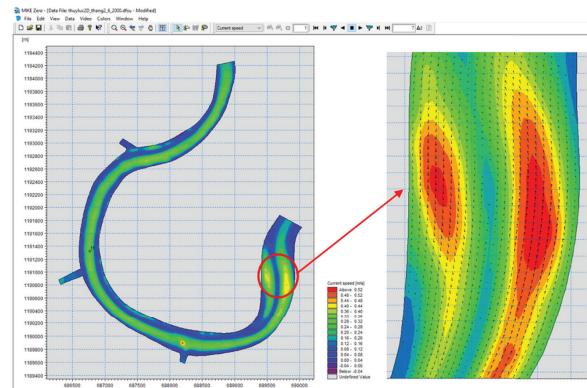


Рис. 9. Распределение скорости течения в начальные фазы прилива в апреле–мае

После этого прилив усилился и стал основным течением реки со средней скоростью около 1 м/с в середине русла, около 0,7 м/с на правом берегу и 0,4

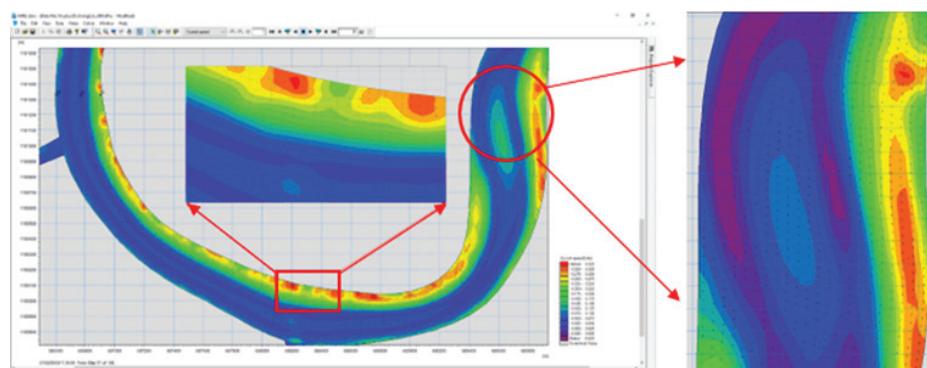


Рис. 8. Распределение скорости течения в конце отлива и в начале прилива

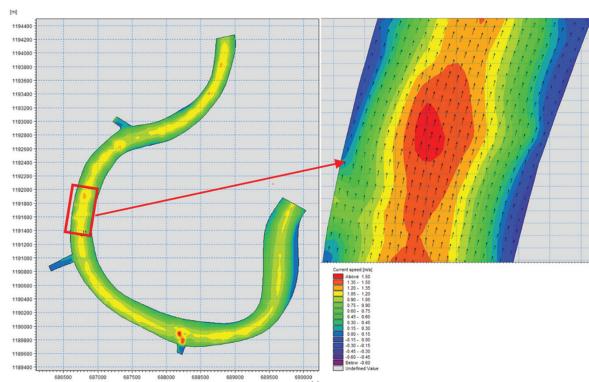


Рис. 10. Распределение скорости течения во время прилива в апреле–мае

м/с на левом берегу. В районе шлюза Тан Тхуан максимальная скорость потока по-прежнему составляет около 1,5 м/с (рис. 10).

Когда прилив отступает в сочетании с течениями вверх по течению, скорость в реке высока, во многих местах около 1,7 м/с, и на многих участках по обеим сторонам реки скорость достигает около 1 м/с. Однако участок реки имеет длину около 1 км на левом берегу возле мыса Даймонд, скорость здесь низкая, всего около 0,2 м/с (рис. 11).

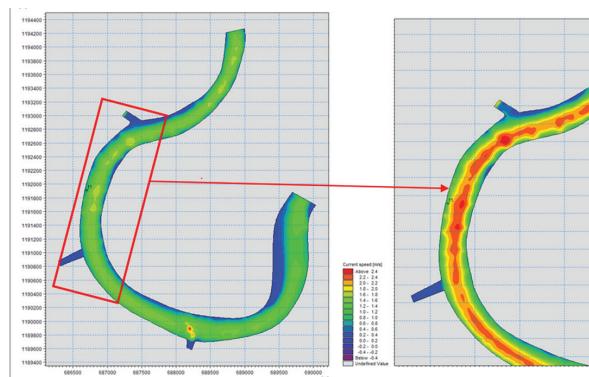


Рис. 11. Распределение скорости течения во время отлива в апреле–мае

#### *Паводковый сезон, когда нет противопаводковых шлюзов*

2000 г. был годом сильных наводнений в дельте Меконга и юго-восточном регионе. В середине октября 2000 г. водохранилище Дау Тиенг спустило очень большой объем воды ( $Q_{\max} = 600 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Во время прилива скорость в середине течения составляет около 0,7–0,8 м/с и снижается примерно до 0,4–0,45 м/с с обеих сторон, но правый берег (вид сверху) высокий, немного больше (рис. 12).

При отливе скорость по обоим берегам реки составляет около 0,4–0,5 м/с, правый берег немного выше, в середине течения скорость составляет около 1,5–1,6 м/с. Однако в районе шлюза Тан Тхуан скорость высокая, почти 3 м/с, кроме того, в ответвлении канала, ведущего к шлюзу Тан Тхуан, слева в направлении течения во время прилива имеется

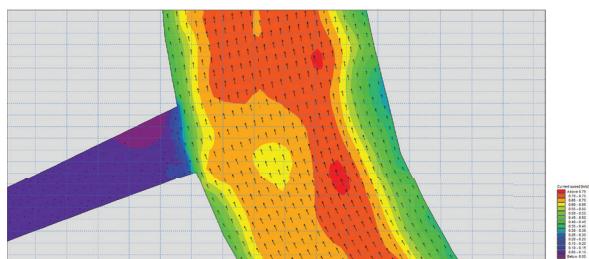
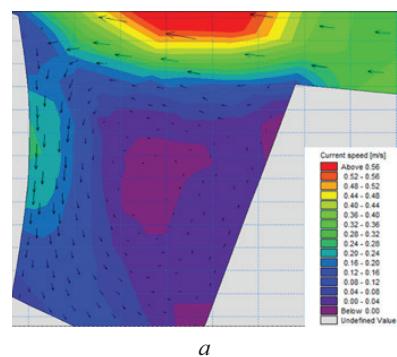


Рис. 12. Распределение скорости течения в половодье во время прилива

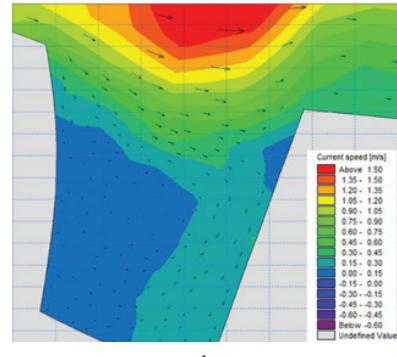
высокий вихрь (рис. 13, а) и вправо во время отлива отмечается небольшая скорость около 0,1–0,2 м/с (рис. 13, б).

Как и в сухой сезон, в конце периода отлива к началу прилива поле скорости течения в реке особое. В частности, основной поток в середине реки течет вниз по течению, а по двум берегам — вверх по течению с более высокой скоростью около 0,2–0,3 м/с. На участке примерно 1 км от мыса Даймонд образовался водоворот с наибольшей скоростью около 0,5 м/с на левом берегу (рис. 14).

Наоборот, при переходе от конца периода прилива к началу отлива основное русло течет вверх по течению, а по двум берегам — вниз по течению. Однако в это время основное течение имеет более высокую скорость и на правом берегу, на участке от шлюза Бен Нге до шлюза Тан Тхуан, и протекает близко к берегу. При этом в это время смены течения левый берег в направлении взгляда с верхнего течения на нижнее всегда имеет наибольшую скорость, затем скорость в середине нового течения

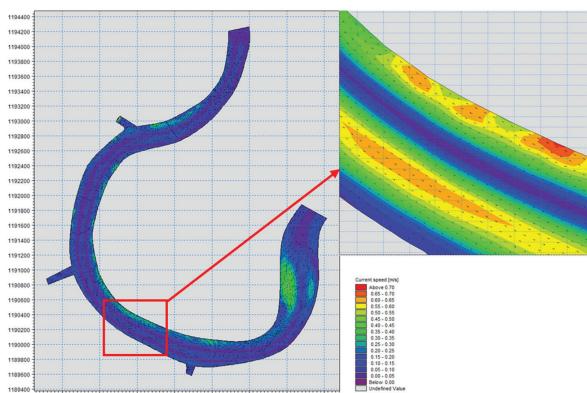


а



б

Рис. 13. Распределение скорости течения в районе шлюза Тан Тхуан в половодье при приливе (а) и отливе (б)

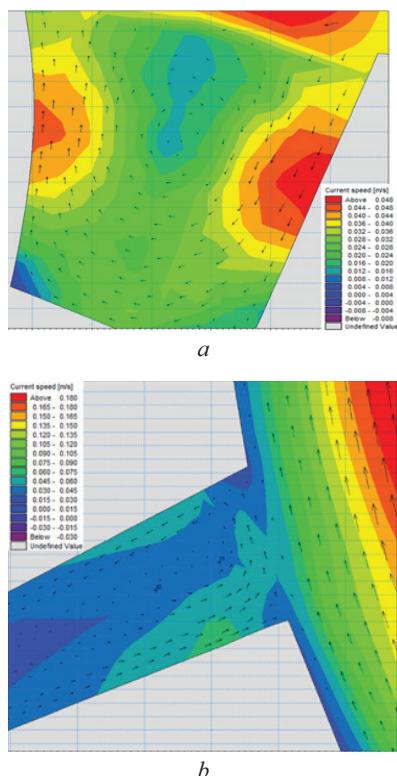


**Рис. 14.** Распределение скорости течения в конце отлива к началу прилива

постепенно увеличивается. Кроме того, скорость течения в русле (где имеются противопаводковые шлюзы) в среднем составляет около 0,1–0,2 м/с, что значительно меньше скорости в реке и на правом берегу.

#### При наличии противопаводковых шлюзов

При эксплуатации противопаводковых шлюзов в целом поле скоростей потока существенно не изменяется в межень и половодье. Значения скорости поперек реки с левого берега на правый или по реке снижены по сравнению с отсутствием противопаводкового шлюза, но разница невелика. В начале канала (там, где расположены шлюзы) имеется круговой поток с небольшой средней скоростью около 0,1–0,15 м/с (рис. 15).



**Рис. 15.** Вихревые течения перед шлюзом Тан Туан (a) и перед шлюзом Нге (b)

Результаты геологической съемки на правом берегу через скважины и отбор проб наносов в реке свидетельствуют о том, что поверхностный материал русла реки и двух берегов представлен в основном иловыми частицами размером 0,002–0,08 мм и частицами глины размером менее 0,002 мм. Следовательно, согласно вьетнамскому стандарту TCVN 4118:2012, неэррозионная скорость частиц грязи и глины  $V_{kx} = 0,26$  м/с. Что касается применения формулы Гончарова, то неэррозионная скорость  $V_{kx} = 0,35$  м/с. Это показывает, что при значении и распределении скорости, как проанализировано выше, р. Сайгон всегда находится в состоянии эрозии, данный процесс наиболее сильно выражен в русле реки, когда средняя скорость в половодье составляет около 0,7–0,8 м/с, а в сухой сезон от 0,5 до 0,6 м/с, это хорошо видно на рис. 16. Поскольку геологическая структура двух берегов реки представляет собой мягкую почву, ил и глину, а течение в реке — поток вверх по течению и прилив, процесс эрозии происходит на обоих берегах реки не только с каждой стороны, вогнутые берега, как и у других рек.

На извилистых участках реки во многих случаях основной поток течет близко к берегу, что ускоряет скорость береговой эрозии и увеличивает масштабы оползней. Вместе с тем в районе шлюза Тан Туан всегда самые высокие скорости, поэтому риск эрозии на дне реки и у берега высок. Кроме того, шлюз Тан Туан является воротами на плавучий рынок, куда ежедневно курсируют сотни лодок, поэтому появление местной большой скорости будет опасно для движения лодок.

Под действием течений берег реки будет непрерывно размываться со временем и в соответствии с высотой уровня воды. Русло реки будет размываться быстрее, чем берег реки из-за высокой скорости течения, поэтому будут образовываться локальные эрозионные ямы, которые постепенно расширяются и углубляются в два берега до предельного состояния, что вызовет неустойчивость и оползни. В начале канала при работе противопаводковых шлюзов появление водоворотов с малой скоростью также повлияет на движение маломерных судов и создаст риск увеличения количества отложений наносов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Скорость течения на р. Сайгон имеет сложное распределение и меняется от периода к периоду в зависимости от паводкового стока из водохранилища Зая Тиенг и приливно-отливных течений Восточного моря.

Значение скорости течения в середине реки примерно в 3–4 раза больше, чем на двух берегах. Однако в промежутках между приливом и отливом течение по обеим сторонам реки имеет более высокое значение скорости, чем у основного потока, особенно на криволинейных вершинах берега, таких как берег реки от шлюза Бен Нге до шлюза Тан

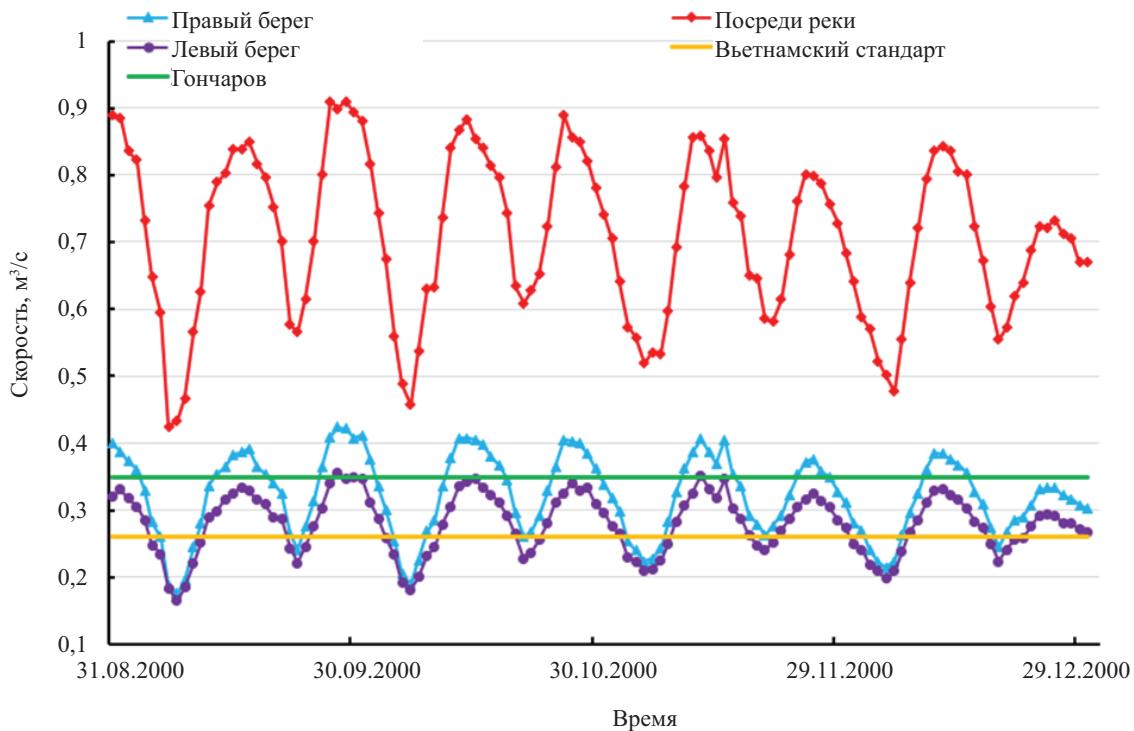


Рис. 16. Расчетная скорость потока и неэррозионная скорость

Тхуан и участок реки от полицейской станции Ан Лой Донг до моста Тху Тиен 2.

Значения скорости на исследуемом участке реки в большинстве случаев превышают допустимые значения безэррозионной скорости частиц руслового материала, берегов рек, а также частиц взвешенных наносов, поэтому процесс размыва по обеим сторонам реки будет происходить регулярно и непрерывно, и необходимо срочно принять меры по защите берега реки. На местном уровне есть несколько мест с максимальной скоростью, которые сделают этот процесс сильнее и серьезнее, например место возле шлюза Тан Тхуан, берег реки от шлюза Бен Нге до шлюза Тан Тхуан и участок

реки от полицейской станции Ан Лой Донг до моста Тху Тиен 2.

При эксплуатации противопаводковых шлюзов это не сильно повлияет на поле скорости течения на р. Сайгон, а лишь немножко уменьшит значение скорости течения, наряду с появлением вихря перед реками, что может повлиять на движение лодок и вызвать осаждение.

Впервые поле скоростей течения р. Сайгон показано на двумерных изображениях. Результаты, изложенные в статье, имеют большое научное значение, помогая исследователям и проектировщикам получить представление о распределении стока и частично объяснить причину нынешних ежедневных оползней в этом районе.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Shi Z., Chen Q., Huang C. The influence of river morphology on the remote sensing based discharge estimation: implications for satellite virtual gauge establishment // Water. 2022. Vol. 14. Issue 23. P. 3854. DOI: 10.3390/w14233854
- Kang C.S., Kanniah K.D. Land use and land cover change and its impact on river morphology in Johor River Basin, Malaysia // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2022. Vol. 41. P. 101072. DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101072
- Chanapathi T., Thatikonda S. Investigating the impact of climate and land-use land cover changes on hydrological predictions over the Krishna river basin under present and future scenarios // Science of The Total Environment. 2020. Vol. 721. P. 137736. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137736
- Liu C., Xia J. Water problems and hydrological research in the Yellow River and the Huai and Hai River basins of China // Hydrological Processes. 2004. Vol. 18. Issue 12. Pp. 2197–2210. DOI: 10.1002/hyp.5524
- Shen Y., Chen Y. Global perspective on hydrology, water balance, and water resources management in arid basins // Hydrological Processes. 2009. Vol. 24. Issue 2. Pp. 129–135. DOI: 10.1002/hyp.7428
- Falkenmark M. The greatest water problem: the inability to link environmental security, water

- security and food security // International Journal of Water Resources Development. 2001. Vol. 17. Issue 4. Pp. 539–554. DOI: 10.1080/07900620120094073
7. Jain V., Karnataka N., Raj A., Shekhar S., Bajracharya P., Jain S. Hydrogeomorphic advancements in river science for water security in India // Water Security. 2022. Vol. 16. P. 100118. DOI: 10.1016/j.wasec.2022.100118
8. 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. Vol. 47. Pp. 19–26.
9. Doan T.V., Le N.A., Hoang Ch.T., Kang T.V. Impact of climate change on sediment distribution in the Dong Nai River Basin // Journal of Hydrology. 2018. Vol. 16. Pp. 9–15.
10. 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.
11. Ho D.P., Nghi L.Q., Sen T.T. Sustainable development in Ho Chi Minh City: Current status and policy implication // VNUHCM Journal of Economics, Business and Law. 2018. Vol. 2. Issue 1. Pp. 31–37. DOI: 10.32508/stdjelm.v2i1.499
12. Oanh T.T.K., Diep N.V., Truyen P.T., Chau N.X.B. The impact of public expenditure on economic growth of provinces and cities in the southern key economic zone of Vietnam: Bayesian approach // Prediction and Causality in Econometrics and Related Topics. 2022. Pp. 328–344. DOI: 10.1007/978-3-030-77094-5\_26
13. Giang N.N.H., Quang C.N.X., Long D.T., Ky P.D., Vu N.D., Tran D.D. Statistical and hydrological evaluations of water dynamics in the lower Sai Gon-Dong Nai River, Vietnam // Water. 2022. Vol. 14. Issue 1. P. 130. DOI: 10.3390/w14010130
14. Hoang V.H. Flow channel change of lower Dong Nai-Sai Gon river and suggestions of prevention solutions // Journal of Water Resources and Environmental Engineering. 2008. Vol. 23. Pp. 30–51.
15. Bai Y., Wang Z. Theory and application of nonlinear river dynamics // International Journal of Sediment Research. 2014. Vol. 29. Issue 3. Pp. 285–303. DOI: 10.1016/s1001-6279(14)60045-7
16. Alexeevsky N.I., Chalov R.S., Berkovich K.M., Chalov S.R. Channel changes in largest Russian rivers: natural and anthropogenic effects // International Journal of River Basin Management. 2013. Vol. 11. Issue 2. Pp. 175–191. DOI: 10.1080/15715124.2013.814660
17. Kondolf G.M., Rubin Z.K., Minear J.T. Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation // Water Resources Research. 2014. Vol. 50. Issue 6. Pp. 5158–5169. DOI: 10.1002/2013WR014651
18. Dang D.N., Le T.H.B. Evaluate the performance of the tidal control system for Ho Chi Minh City // Journal of Science and Technology Irrigation. 2021. Vol. 65. Pp. 35–55.
19. Nguyen P.K., Da D.H., Da H.L. Evaluation of water indicators and water level changes in the Saigon River under the influence of Dau Tieng // Water Resources Scientific and Technical Journal. 2018. Vol. 44. Pp. 15–32.
20. Tran H.T. Assessing the impact of climate change on floods in the lower reaches of the Dong Nai River // Scientific Journal of VNU, Earth Sciences. 2011. Vol. 27. Pp. 25–31.
21. Wang V.L., Dang H.B. Impact of reservoir area reduction on water levels in the lower reaches of the Sai Gon-Dong Nai river system // International Journal of River Basin Management. 2019. Vol. 28. Pp. 39–58.
22. Nữ H.T.T., Vũ Đ.T., Phùng L.V., Văn C.T. Mô phỏng mức độ ngập và đề xuất giải pháp thoát nước chống ngập cho khu vực Văn Thánh — thành phố Hồ Chí Minh // Vietnam Journal of Hydrometeorology. 2020. Vol. 716. Issue 8. Pp. 12–25. DOI: 10.36335/VNJHM.2020(716).12-25
23. Pham V.S., Dang D.T., Le X.B. Research results impact of reserver Dau Tieng disposal on Sai Gon river // Journal of Hydraulic Science and Technology. 2013. Issue 19. Pp. 42–58.
24. Hoàng T.T., Bình P.Á., Đồng N.P., Toàn H.C., Hiền N.T., Hải C.T. Đánh giá sự thay đổi lưu lượng về hồ Dầu Tiếng theo các kịch bản biến đổi khí hậu // Vietnam Journal of Hydrometeorology. 2020. Vol. 720. Issue 12. Pp. 61–77. DOI: 10.36335/VNJHM.2020(720).6-77
25. Panda R.K., Pramanik N., Bala B. Simulation of river stage using artificial neural network and MIKE 11 hydrodynamic model // Computers & Geosciences. 2010. Vol. 36. Issue 6. Pp. 735–745. DOI: 10.1016/j.cageo.2009.07.012
26. 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
27. Filipova V., Rana A., Singh P. Urban flooding in Gothenburg — a MIKE21 study // VATEN — Journal of Water Management and Research. 2012. Vol. 68. Pp. 175–184.
28. 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. Pp. 885–900.

Поступила в редакцию 26 апреля 2023 г.

Принята в доработанном виде 15 июня 2023 г.

Одобрена для публикации 15 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; 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; 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.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## INTRODUCTION

Rivers are natural streams on the surface of the continent, fed by rainwater, groundwater and meltwater [1–3]. Rivers play the role of water transport in the hydrological cycle of a basin and at the same time represent characteristics of water security, ecology and environment of a district, city or country [4–7]. Maintaining the stability of river flow is a relevant issue for the livelihoods and production process of people living on both sides of the river.

The Saigon River originates in low hills, with a relative elevation of about 150 m in Binh Phuoc province, flows through Lake Dau Tieng (Tai Ninh), through Binh Truong province and on to Sai Gon [8, 9]. At the junction of the Red Cape, the Saigon River joins the Dong Nai River to form the Saigon — Dong Nai River system and then flows into the sea. The Saigon River has a total length of 256 km, of which the section flowing through Ho Chi Minh City is 80 km [10].

Over the past decades, Binh Duong and Ho Chi Minh City have remained the country's leading economic centres, ranking among the top five regions with the highest GDP in Vietnam [11, 12]. Due to the economic growth of this region, the role of the Saigon River with the largest inland waterway system in terms of capacity in Vietnam cannot be overlooked. Moreover, Ho Chi Minh City is also

a major urban area in Vietnam with a population of over 9 million people. Consequently, any change in the flow and morphology of the Saigon River affects economic development as well as the lives of Ho Chi Minh City and the provinces on both sides of the river (Fig. 1).

There are many causes leading to river landslides, such as: geological characteristics, sand mining, infrastructure construction, urban development, the impact of shipping, etc., with the hydrological regime of river flow being one of the main factors causing erosion [13–17]. The Saigon River is not only influenced by the upstream current, but is also highly dependent on the East Sea tide with a semi-diurnal tidal regime. This makes the hydraulic regime of the Saigon River. Saigon is more complex and different from many rivers in the world. Therefore, it is necessary to study and assess the flow variation of the Saigon River.

Since mid-2016 Ho Chi Minh City has launched a project to build six flood control sluices on tributaries of the Saigon River in accordance with Prime Minister's Decree No. 1547/QĐ-TTg to protect the central region from the effects of climate change and sea level rise. It is important to answer the question of how this will affect the flow regime of the Saigon River during the construction works.

A number of studies have been done on flood control structures and the Saigon-Dong Nai River basin. Nguyen and Binh [18] showed that when precipitation



Fig. 1. Washout on the bank of the Saigon River

and tidal peaks occur at the same time, the protective capacity of the flood control sluice system in Ho Chi Minh City is negligible. Do Dac Hai [10], Phu Quynh [19] concluded that there is a need for anti-sink structures in the inner part of the city. Ho Chi Minh City is bound to affect the hydrological regime and water quality in the downstream areas, including the salt intrusion problem. The sensitivity to climate change, sea level rise and land use in this area has been considered by Tran [20], Van [21]. Toh Nu [22] models the flood level and proposes flood control drainage solutions for the Van Thanh-Ho Chi Minh City area. Shong [23], Hoang [24] studied the effects of oil reservoir discharge in the lower reaches of Saigon River.

The aim of this study is to analyse the effects of flow on riverbank erosion through a two-dimensional flow velocity field, taking into account the impact of flood protection structures. The results of the article will provide an important scientific basis for providing solutions for preventing and overcoming two river bank erosion in conjunction with urban planning in a modern and sustainable way.

## MATERIALS AND METHODS

### Field of study

The section of the Saigon River from Saigon Bridge to Cape Diamond (marked in red in Fig. 2) was chosen to build the 2D model. This is an important stretch of the river with the political and economic centre of Ho Chi Minh City on one bank and Thu Thiem district on the other, which is planned to become an economic centre, Vietnam's largest financial and international trade centre. Two of the six flood control sluices, namely Ben Nghe and Tan Thuan, are also being built on this stretch of river.

### Research methods

In this paper the hydraulic module (HD) of the MIKE 11 and MIKE 21 models is used to investigate the flow velocity field of a section of the Saigon River.

MIKE 11 HD computes unsteady water level and flow in rivers and estuaries using an implicit, one-dimensional, finite-difference formulation (fully dynamic higher-order Saint-Venin equations), which are solved using the 6-point Abbott-Ionescu method [25].



Fig. 2. Location of the study area

It is applicable to vertically homogeneous flows from steep rivers to estuaries subject to tidal action. It is also possible to simulate flow through a wide range of structures such as broad crest spillways, culverts, control structures, bridges and user defined structures.

The input data for the MIKE 11 HD model includes: river network, cross-section parameters, water level flow values at boundary points. The Saigon-Dong Nai river network is shown in Fig. 3.

MIKE 21FM is a two-dimensional hydrodynamic

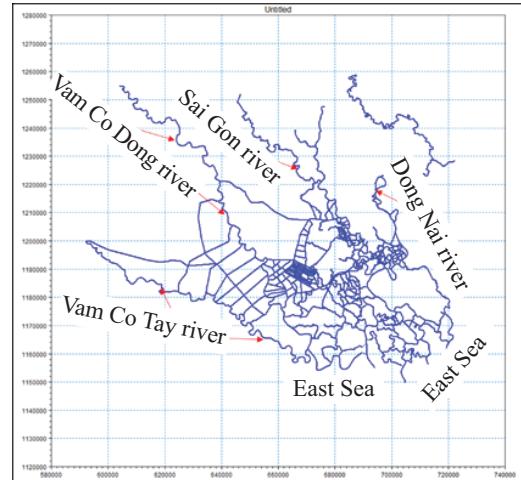


Fig. 3. Saigon – Dong Nai river network on MIKE 11

model that simulates water levels and currents in rivers, estuaries, bays and coastal areas. A simulation model of two-dimensional unsteady flow for a current layer is presented in [26, 27]. The system of simulation equations includes continuity equations combined with momentum equations describing changes in water level and flow rate. The topography of the Saigon River section based on the Mike 21FM model from the authors' survey carried out in September 2022 is shown in Fig. 4.

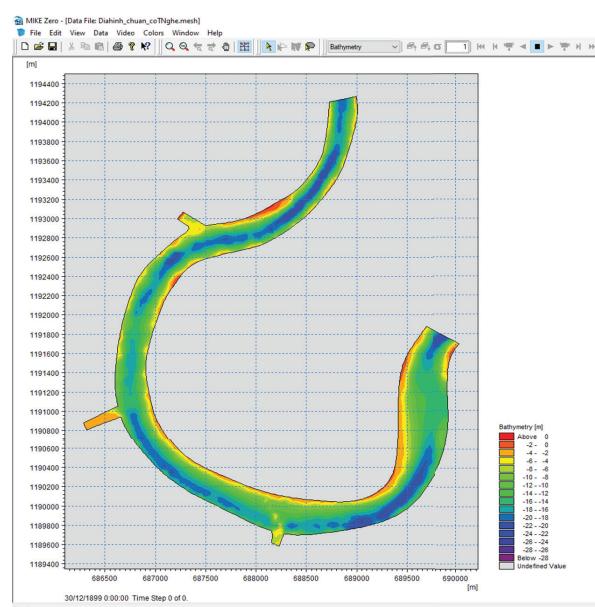
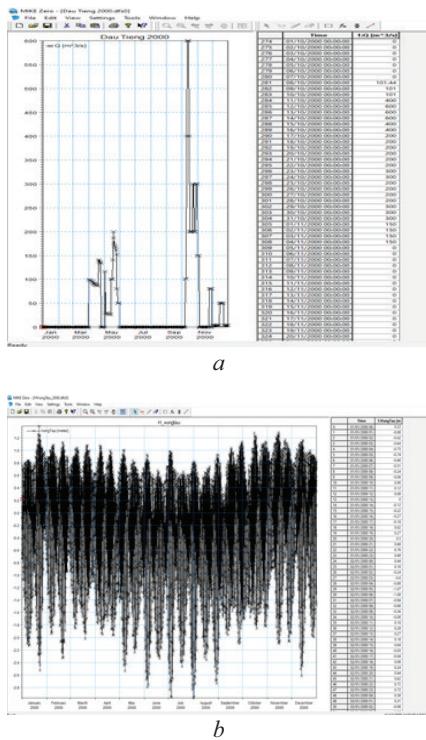


Fig. 4. Topography of the Saigon River section from Saigon Bridge to Cape Diamond

## Calculation scenario

In order to study the change and distribution of the flow velocity field on the Saigon River when the flood gates were triggered, design scenarios for the year 2000, when flooding caused great damage to the Mekong River delta and the Saigon-Dong Nai area, were selected. The flood discharge of the Dau Tieng reservoir and the water level in Vung Tau in 2000 are shown in Fig. 5.

## RESEARCH RESULTS



**Fig. 5.** Flood discharge of Dau Tieng Reservoir (a) and water level in Vung Tau (b) in 2000

## Model calibration and validation

The Mike 11HD model is calibrated using actual data measured at the hydrological stations from October 1 to December 15, 2010 and verification at Bien Hoa, Thu Thu Dau Mot stations from June 1 to June 16 2009. Good agreement between modelled and observed water levels in different time periods can be seen.

The Mike 21FM was tested with water levels at the Phu An gauging station from October 1 to November 31, 2013 (Fig. 6).

The accuracy of the numerical results was assessed by means of the determination coefficient  $R^2$  and the Nash-Sutcliffe coefficient  $E_f$  (Table). According to Moriasi's efficiency criteria [28], the coefficients  $R^2$  and  $E_f$  show that the model has high reliability when modelling the flow.

### Performance of Mike 11 and Mike 21 for water level modelling

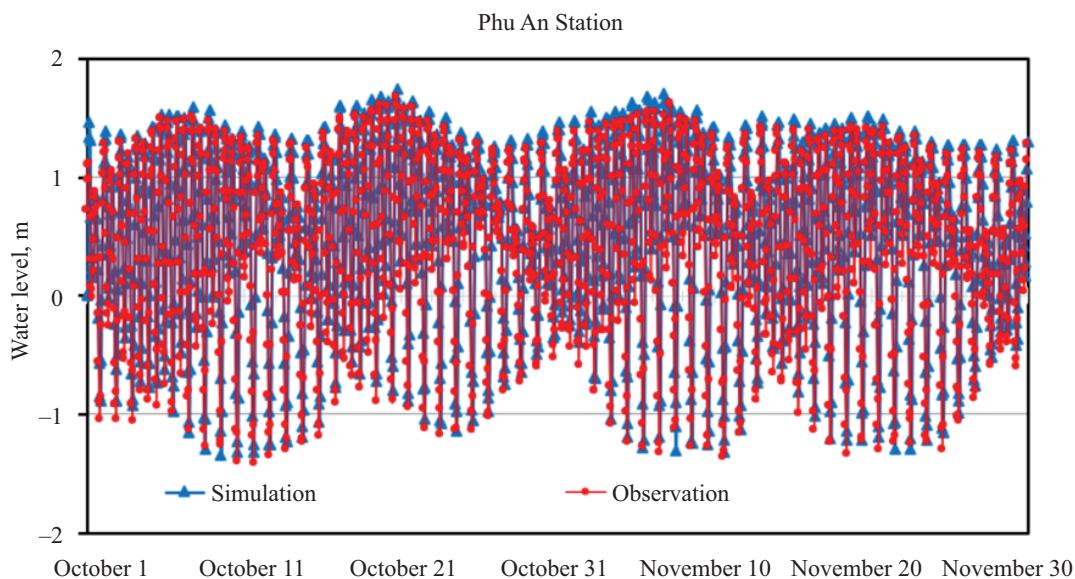
Station	Mike 11HD		Mike 21FM	
	(01.06.2009–16.09.2009)		(01.10.2013–30.11.2013)	
	$R^2$	$E_f$	$R^2$	$E_f$
Bien Hoa	0.91	0.83	—	—
Thu Dau Mot	0.97	0.91	—	—
Phu An	—	—	0.98	0.96

## Results

The section of river from Saigon Bridge to Cape Diamond has a topography consisting of many winding sections whose flow is affected by both upstream flood flows and tides in the East Sea. The hydraulic regime is therefore very complex with continuous changes in flow direction throughout the day.

### Dry season when there are no flood defences

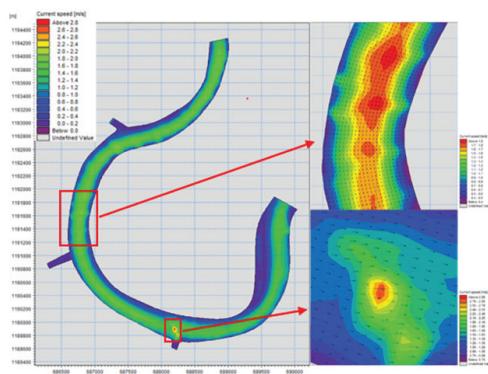
During the early months of the dry season, the Dau Tieng Reservoir discharges only enough water for irrigation



**Fig. 6.** Water level at Phu An station, temporary measurement from October 1 to November 30, 2013

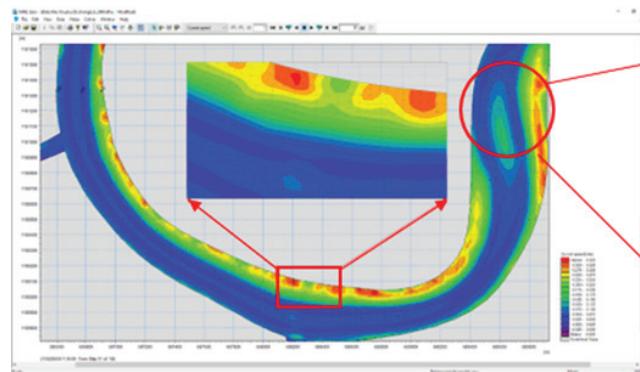
and daily life, so the flow of the Saigon River is influenced by the East Sea tide with two tides per day. Saigon is influenced by the tide of the East Sea with two tides per day.

Considering the field of current velocities during the period from high tide to low tide, it is found that, both at high and low tide, the flow in the middle of the river is always greatest, then gradually decreases towards the two banks. At low tide, the flow is twice as fast as at high tide, at low tide the average speed in the middle of the river is about 1.6 m/s, while on both banks of the river it is only about 0.4 m/s. However, locally there is a place with a very high velocity ( $V_{\max} = 2.96 \text{ m/s}$ ) near the Tan Thuan sluice, this can be clearly seen in Fig. 7.



**Fig. 7.** Flow velocity field of the Saigon section at low tide

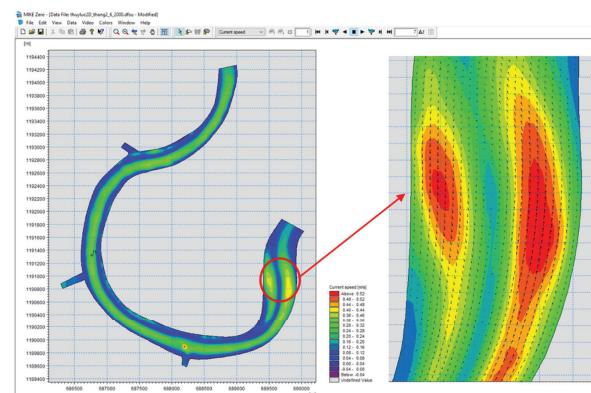
At high tide, the average current speed in the middle of the river is about 0.7 m/s, while on both sides of the river it is only about 0.3 m/s. The Tan Thuan sluice area is still the area with the strongest current. In addition, at the end of the high tide and beginning of the low tide, the flow in the river has a particular distribution (Fig. 8). At this time, the main flow in the river tends to flow upstream, but on both sides of the river the water flows back downstream at a rate 2–3 times that of the main flow. In addition to the swirling currents appearing at a location about 1km from Cape Diamond, the speed in the area of the whirlpool is also low, only about 0.1–0.2 m/s.



**Fig. 8.** Distribution of current velocity at the end of low tide and at the beginning of high tide

During the peak months of the dry season (April and May) the Dau Tieng reservoir discharges large volumes of water, resulting in a strong change in flow velocity distribution. At the first time of a new tide, the upstream velocity distribution is formed simultaneously with the upstream velocity distribution, as shown in Fig. 9. The upstream flow to the downstream side of the river is called the midstream flow — this is the tide flowing upstream. On some curved sections of the river the upstream current flows close to the shore, while at a distance from Cape Almazny there are still eddy currents with a maximum velocity of about 0.4 m/s. In general, the current velocity is not too high at this time.

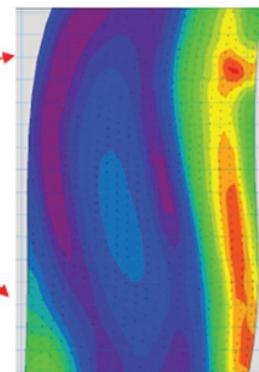
The tide then increased and became the main flow

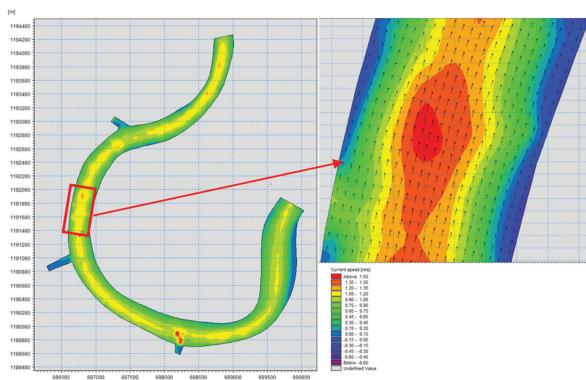


**Fig. 9.** Distribution of current velocity during the initial phases of the April-May tide

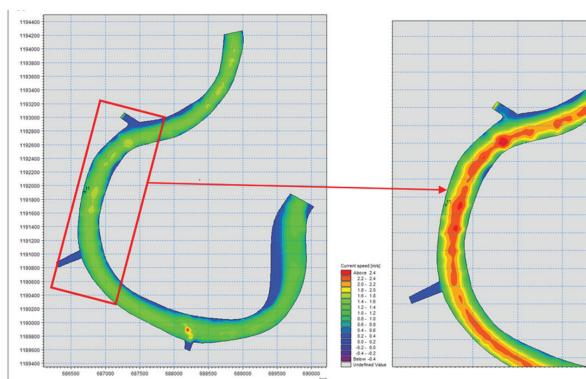
of the river with an average velocity of about 1 m/s in the middle of the channel, about 0.7 m/s on the right bank and 0.4 m/s on the left bank. At the Tan Thuan sluice, the maximum flow velocity is still about 1.5 m/s (Fig. 10).

When the tide recedes in conjunction with the upstream currents, speeds in the river are high, in many places around 1.7 m/s, and in many sections on both sides of the river speeds reach around 1 m/s. However, a section of the river is about 1 km long on the left bank near Cape Diamond, the speed here is low, only about 0.2 m/s (Fig. 11).





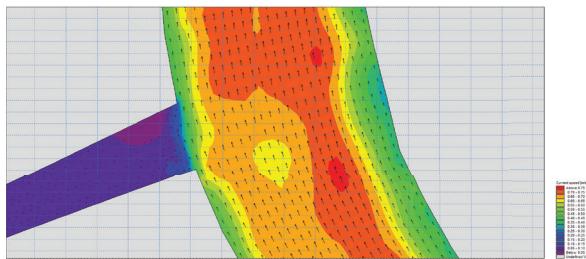
**Fig. 10.** Distribution of current velocity at high tide in April-May



**Fig. 11.** Distribution of current velocity at low tide in April and May

#### Flood season when there are no flood defences

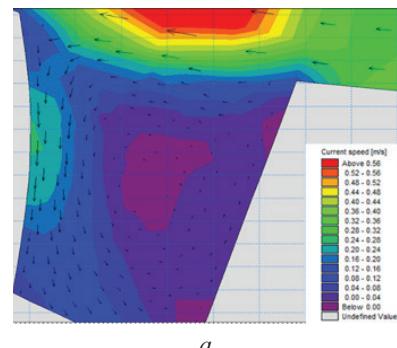
2000 was a year of severe flooding in the Mekong Delta and the southeastern region. In mid-October 2000, the Dau Tieng reservoir released a very large volume of water ( $Q_{\max} = 600 \text{ m}^3/\text{s}$ ). At high tide, the midstream velocity is about 0.7–0.8 m/s and decreases to about



**Fig. 12.** Flow velocity distribution at high tide

0.4–0.45 m/s on both sides, but the right bank (top view) is high, slightly higher (Fig. 12).

At low tide the speed on both banks of the river is about 0.4–0.5 m/s, the right bank is slightly higher, at midstream the speed is about 1.5–1.6 m/s. However, near Tan Thuan sluice the speed is high, almost 3 m/s, in addition, there is a high eddy on the left side of the channel leading to Tan Thuan sluice at high tide

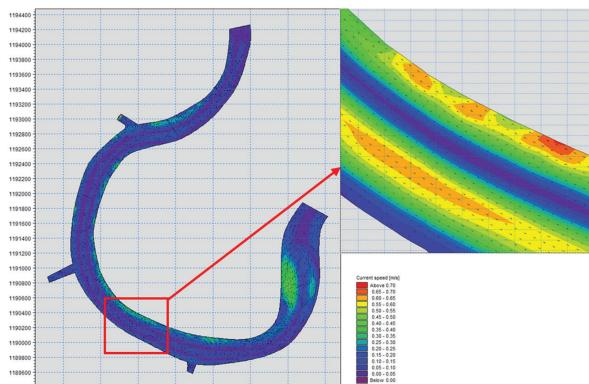


**Fig. 13.** Current velocity distribution at Tan Thuan sluice at high tide (a) and low tide (b)

(Fig. 13, a) and on the right side at low tide there is a small speed of about 0.1–0.2 m/s (Fig. 13, b).

As in the dry season, at the end of the low tide to the beginning of the high tide, the flow velocity field in the river is particular. In particular, the main flow in the middle of the river flows downstream, while on the two banks it flows upstream at a higher speed of about 0.2–0.3 m/s. A whirlpool with the highest velocity of about 0.5 m/s on the left bank has formed on a section of about 1 km from Cape Diamond (Fig. 14).

On the contrary, during the transition from the end of the high tide period to the beginning of the low tide, the main channel flows upstream and on the two banks it flows downstream. At this time, however, the mainstream also has higher velocity on the right bank, in the section from Ben Nghe sluice to Tan Thuan sluice, and flows close to the shore. At this time of the current change,



**Fig. 14.** Distribution of current velocity at the end of low tide to the beginning of high tide

the left bank in the upstream to downstream direction of view always has the highest speed, then the speed in the middle of the new current gradually increases. In addition, the current velocity in the channel (where there are flood control sluices) is on average about 0.1–0.2 m/s, which is considerably lower than the velocity in the river and on the right bank.

#### *Where flood defences are in place*

The flow velocity field does not change significantly during low flow and high water during operation of flood control sluices in general. The velocity values across the river from the left bank to the right bank or along the river are reduced compared to the absence of a flood control sluice, but the difference is not great. At the beginning of the channel (where the sluices are located) there is a circular flow with a small average velocity of about 0.1–0.15 m/s (Fig. 15).

The results of the geological survey on the right bank through boreholes and sediment sampling in

the river indicate that the surface material of the river channel and the two banks is mainly represented by silt particles of 0.002–0.08 mm and clay particles of less than 0.002 mm. Consequently, according to the Vietnamese standard TCVN 4118:2012, the non-erosion velocity of mud and clay particles  $V_{kx} = 0.26$  m/s. Regarding the application of Goncharov's formula, the non-erosion velocity  $V_{kx} = 0.35$  m/s. This shows that with the value and distribution of velocity as analysed above, the Saigon River is always in a state of erosion, this process is most pronounced in the river channel, when the average velocity in the flood is about 0.7–0.8 m/s, and in the dry season from 0.5 to 0.6 m/s, this can be clearly seen in Fig. 16. As the geological structure of the two riverbanks is soft soil, silt and clay, and the flow in the river is upstream and tidal, the process of erosion does not occur on either side of the riverbank alone, concave banks like those of other rivers.

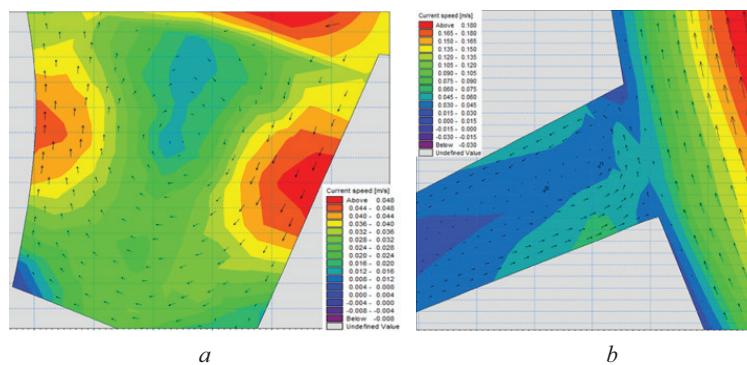


Fig. 15. Eddy currents upstream of Tan Thuan sluice (a) and upstream of Nghe sluice (b)

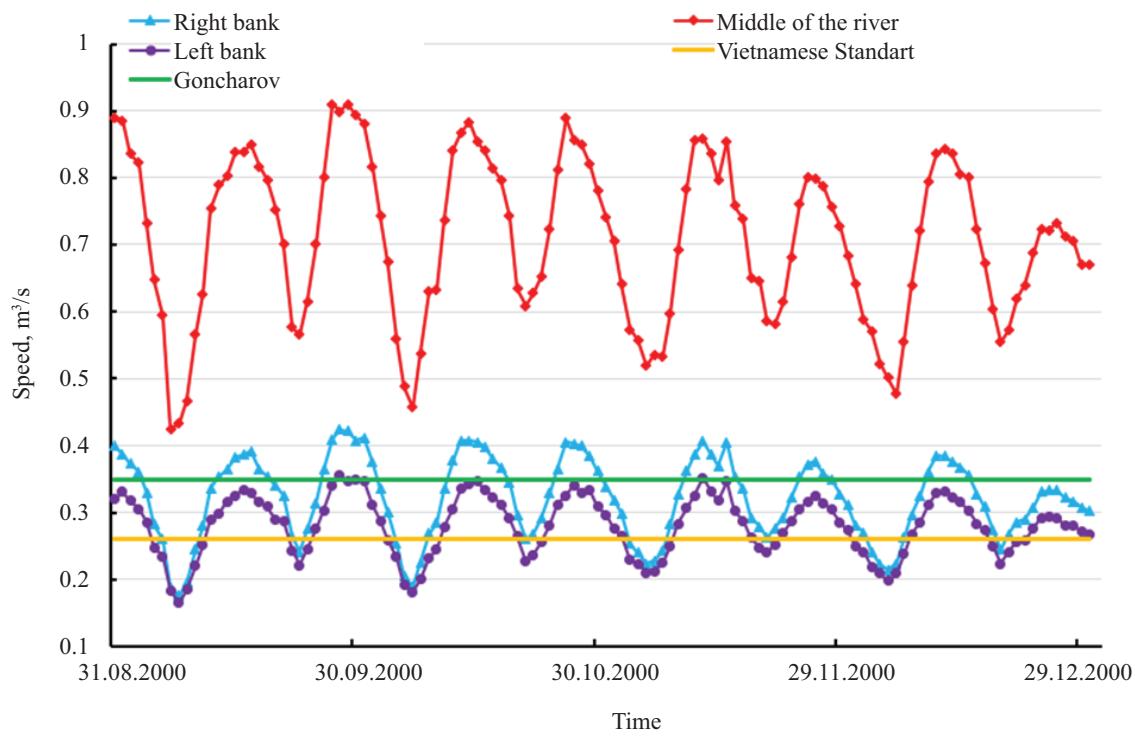


Fig. 16. Calculated flow velocity and non-erosion velocity

In the winding sections of the river, in many cases the main flow is close to the shore, which accelerates the rate of coastal erosion and increases the extent of landslides. At the same time, Tan Thuan sluice always has the highest velocities, so the risk of erosion on the river bed and near the shore is high. In addition, Tan Thuan sluice is the gateway to the floating market, where hundreds of boats ply daily, so the occurrence of local high speeds will be dangerous for boat traffic.

The river bank will be continuously eroded over time and in accordance with the water level elevation due to currents. The river channel will erode faster than the river bank due to the high current velocity and therefore local erosion pits will be formed, which will gradually widen and deepen into the two banks to the limit state, causing instability and landslides. At the beginning of the channel when the flood control sluices are in operation, the occurrence of low velocity whirlpools will also affect the movement of small vessels and create a risk of increased sediment deposition.

## CONCLUSION AND DISCUSSION

The current velocity on the Saigon River has a complex distribution and varies from period to period depending on the flood discharge from the Dau Tieng reservoir and the tidal currents of the East Sea.

The flow velocity value in the middle of the river is about 3–4 times higher than on the two banks. However, between high and low tide, the current

on both sides of the river has a higher velocity value than that of the main stream, especially on curved bank tops such as the river bank from Ben Nghe sluice to Tan Thuan sluice and the section of the river from An Loi Dong police station to Thu Thiem Bridge 2.

The velocity values in the studied river section are in most cases higher than the allowable erosion free velocity values of particles of channel material, river banks as well as suspended sediment particles, so the erosion process on both sides of the river will occur regularly and continuously and urgent measures to protect the river bank are needed. Locally, there are several locations with maximum velocities that will make this process stronger and more serious, such as the location near Tan Thuan sluice, the river bank from Ben Nghe sluice to Tan Thuan sluice and the section of the river from An Loi Dong police station to Thu Thiem 2 bridge.

When operating the flood control sluices, this will not affect the flow velocity field on the Saigon River much, but will only slightly reduce the value of the flow velocity, along with the appearance of an eddy ahead of the rivers, which may affect boat traffic and cause sedimentation.

For the first time, the flow velocity field of the Saigon River is shown on two-dimensional images. The results presented in the paper are of great scientific importance, helping researchers and planners to gain insight into the flow distribution and partly explain the cause of the current daily landslides in the area.

## REFERENCES

- Shi Z., Chen Q., Huang C. The influence of river morphology on the remote sensing based discharge estimation: implications for satellite virtual gauge establishment. *Water*. 2022; 14(23):3854. DOI: 10.3390/w14233854
- Kang C.S., Kanniah K.D. Land use and land cover change and its impact on river morphology in Johor River Basin, Malaysia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2022; 41:101072. DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101072
- Chanapathi T., Thatikonda S. Investigating the impact of climate and land-use land cover changes on hydrological predictions over the Krishna river basin under present and future scenarios. *Science of The Total Environment*. 2020; 721:137736. DOI: 10.1016/j.scitenv.2020.137736
- Liu C., Xia J. Water problems and hydrological research in the Yellow River and the Huai and Hai River basins of China. *Hydrological Processes*. 2004; 18(12):2197-2210. DOI: 10.1002/hyp.5524
- Shen Y., Chen Y. Global perspective on hydrology, water balance, and water resources management in arid basins. *Hydrological Processes*. 2009; 24(2):129-135. DOI: 10.1002/hyp.7428
- Falkenmark M. The greatest water problem: the inability to link environmental security, water security and food security. *International Journal of Water Resources Development*. 2001; 17(4):539-554. DOI: 10.1080/07900620120094073
- Jain V., Karnataka N., Raj A., Shekhar S., Bajracharya P., Jain S. Hydrogeomorphic advancements in river science for water security in India. *Water Security*. 2022; 16:100118. DOI: 10.1016/j.wasec.2022.100118
- 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.
- Doan T.V., Le N.A., Hoang Ch.T., Kang T.V. Impact of climate change on sediment distribution in the Dong Nai River Basin. *Journal of Hydrology*. 2018; 16:9-15.
- Do D.H. Assessing the impact of urbanization, the construction of waterproofing structures on the already implemented Dong Nai – Sai Gon. *Wa-*

- ter Resources Scientific and Technical Journal.* 2018; 49:22-30.
11. Ho D.P., Nghi L.Q., Sen T.T. Sustainable development in Ho Chi Minh City: Current status and policy implication. *VNUHCM Journal of Economics, Business and Law.* 2018; 2(1):31-37. DOI: 10.32508/stdjelm.v2i1.499
  12. Oanh T.T.K., Diep N.V., Truyen P.T., Chau N.X.B. The impact of public expenditure on economic growth of provinces and cities in the southern key economic zone of Vietnam: Bayesian approach. *Prediction and Causality in Econometrics and Related Topics.* 2022; 328-344. DOI: 10.1007/978-3-030-77094-5\_26
  13. Giang N.N.H., Quang C.N.X., Long D.T., Ky P.D., Vu N.D., Tran D.D. Statistical and hydrological evaluations of water dynamics in the lower Sai Gon-Dong Nai River, Vietnam. *Water.* 2022; 14(1):130. DOI: 10.3390/w14010130
  14. Hoang V.H. Flow channel change of lower Dong Nai-Sai Gon river and suggestions of prevention solutions. *Journal of Water Resources and Environmental Engineering.* 2008; 23:30-51.
  15. Bai Y., Wang Z. Theory and application of nonlinear river dynamics. *International Journal of Sediment Research.* 2014; 29(3):285-303. DOI: 10.1016/s1001-6279(14)60045-7
  16. Alexeevsky N.I., Chalov R.S., Berkovich K.M., Chalov S.R. Channel changes in largest Russian rivers: natural and anthropogenic effects. *International Journal of River Basin Management.* 2013; 11(2):175-191. DOI: 10.1080/15715124.2013.814660
  17. Kondolf G.M., Rubin Z.K., Minear J.T. Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation. *Water Resources Research.* 2014; 50(6):5158-5169. DOI: 10.1002/2013WR014651
  18. Dang D.N., Le T.H.B. Evaluate the performance of the tidal control system for Ho Chi Minh City. *Journal of Science and Technology Irrigation.* 2021; 65:35-55.
  19. Nguyen P.K., Da D.H., Da H.L. Evaluation of water indicators and water level changes in the Saigon River under the influence of Dau Tieng. *Water Resources Scientific and Technical Journal.* 2018; 44:15-32.
  20. Tran H.T. Assessing the impact of climate change on floods in the lower reaches of the Dong Nai River. *Scientific Journal of VNU, Earth Sciences.* 2011; 27:25-31.
  21. Wang V.L., Dang H.B. Impact of reservoir area reduction on water levels in the lower reaches of the Sai Gon-Dong Nai river system. *International Journal of River Basin Management.* 2019; 28:39-58.
  22. Nữ H.T.T., Vũ Đ.T., Phùng L.V., Văn C.T. Mô phỏng mức độ ngập và đề xuất giải pháp thoát nước chống ngập cho khu vực Văn Thánh — thành phố Hồ Chí Minh. *Vietnam Journal of Hydrometeorology.* 2020; 716(8):12-25. DOI: 10.36335/VNJHM.2020(716).12-25
  23. Pham V.S., Dang D.T., Le X.B. Research results impact of reserver Dau Tieng disposal on Sai Gon river. *Journal of Hydraulic Science and Technology.* 2013; 19:42-58.
  24. Hoàng T.T., Bình P.Á., Đông N.P., Toàn H.C., Hiền N.T., Hải C.T. Đánh giá sự thay đổi lưu lượng về hồ Dầu Tiếng theo các kịch bản biến đổi khí hậu. *Vietnam Journal of Hydrometeorology.* 2020; 720(12):6177. DOI: 10.36335/VNJHM.2020(720).61-77
  25. Panda R.K., Pramanik N., Bala B. Simulation of river stage using artificial neural network and MIKE 11 hydrodynamic model. *Computers & Geosciences.* 2010; 36(6):735-745. DOI: 10.1016/j.cageo.2009.07.012
  26. 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
  27. Filipova V., Rana A., Singh P. Urban flooding in Gothenburg — a MIKE21 study. *VATTEN—Journal of Water Management and Research.* 2012; 68:175-184.
  28. 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; 50:885-900.

Received April 26, 2023.

Adopted in revised form on June 15, 2023.

Approved for publication on June 15, 2023.

**Bionotes:** 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; 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; pkhanhkhahn@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.