



УДК [556.531.3+556.531.4](911.6)

## ОЦЕНКА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЛАВНЫХ РЕК ДЕЛЬТЫ МЕКОНГА И ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ

© 2023 Е. П. Карпова<sup>1,2</sup>, Ку Нгуен Динь<sup>2</sup>, С. В. Статкевич<sup>1,2</sup>, Чыонг Ба Хай<sup>2</sup>,  
И. И. Чеснокова<sup>1,2</sup>, С. В. Куршаков<sup>1,2</sup>, Э. Р. Аблязов<sup>1,2</sup>,  
Е. Е. Слынько<sup>2,3</sup>, Зыонг Тхи Ким Чи<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей  
имени А.О. Ковалевского РАН» (ФИЦ ИнБЮМ), Севастополь 299011, Россия

<sup>2</sup>Южное отделение Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского  
и технологического центра, Хошимин 70000, Вьетнам

<sup>3</sup>ФГБУН «Институт биологии внутренних вод имени И.Д. Папанина РАН» (ИБВВ РАН),  
Борок 152742, Россия

E-mail: [karpova\\_jeu@mail.ru](mailto:karpova_jeu@mail.ru)

**Аннотация.** Дельта реки Меконг входит в число крупнейших азиатских мегадельт, является уникальным по биоразнообразию районом и главным источником продовольствия для значительной части населения Вьетнама и Камбоджи. Снижение биоразнообразия и ресурсного потенциала дельты, связанное с ростом антропогенного воздействия и других негативных экологических факторов, требует усилий по поддержанию ее экосистемы в состоянии, благоприятном для жизни водных организмов, для чего первым шагом является организация результативного мониторинга водных сообществ, при которой необходимо учитывать сложную структуру дельты и связанные с этим особенности физико-химических характеристик среды обитания. Средние и интервальные значения параметров были следующими: прозрачность —  $47,7 \pm 16,4$  (10–100) см; в поверхностном слое воды температура  $29,7 \pm 1,37$  (26,0–33,3) °С, удельная электропроводность —  $5490,4 \pm 8392,5$  (133–33623) мкСм/см, общее количество растворенных твердых веществ —  $3556,2 \pm 5445,8$  (86,5–21853), рН —  $7,6 \pm 0,3$  (6,9–8,4), растворенный кислород —  $4,8 \pm 1,05$  (3,0–8,9) мг/л; в придонном слое температура  $29,6 \pm 1,43$  (26,0–34,1) °С, удельная электропроводность —  $7671,4 \pm 11193,2$  (125–37870) мкСм/см, общее количество растворенных твердых веществ —  $4905,3 \pm 7199,8$  (78,0–24615,5), рН —  $7,6 \pm 0,3$  (6,9–8,2), растворенный кислород —  $4,6 \pm 1,00$  (2,6–7,7) мг/л. Основанное на знании особенностей окружающей среды зонирование дельты позволяет наиболее рационально организовать процесс мониторинга. По результатам анализа физико-химических параметров были определены границы зон с различными условиями среды, оказывающими влияние на формирование ихтиоценов, главными из которых являлись соленость (3 зоны), кислородный режим (3 зоны) и распределение стока (4 зоны). Установлена взаимосвязь зонирования дельты по гидрохимическому

режиму и структурных особенностей ихтиоценов на уровне семейств, что подтверждает необходимость учитывать это зонирование при организации мониторинговых исследований.

**Ключевые слова:** Меконг, дельта, экологические факторы, гидрохимические параметры, ихтиоцены, зонирование

## ASSESSMENT OF THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF THE MAIN RIVERS OF THE MEKONG DELTA AND THEIR ECOLOGICAL ZONING

E. P. Karpova<sup>1,2</sup>, Cu Nguyen Dinh<sup>2</sup>, S. V. Statkevich<sup>1,2</sup>, Truong Ba Hai<sup>2</sup>, I. I. Chesnokova<sup>1,2</sup>, S. V. Kurshakov<sup>1,2</sup>, E. R. Ablyazov<sup>1,2</sup>, E. E. Slynko<sup>2,3</sup>, Duong Thi Kim Chi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FSBIS Federal Research Center "A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS" (FRC IBSS), Sevastopol 299011, Russia

<sup>2</sup>Southern Branch of the Joint Russian-Vietnamese Tropical Research and Technological Center, Ho Chi Minh 70000, Vietnam

<sup>3</sup>FSBIS "Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS" (IBIW RAS), Borok 152742, Russia

E-mail: karpova\_jey@mail.ru

**Abstract.** The Mekong Delta is one of Asia's largest megadeltas. It is a region with unique biodiversity and the main food source for a large part of the population of Vietnam and Cambodia. The decrease in the biodiversity and resource capacity of the delta, associated with the growth of anthropogenic impact and other negative environmental factors, requires effort to maintain its ecosystem in a state favorable for the life of aquatic organisms, for which the first step is to organize effective monitoring of aquatic communities. Its organization must consider the complex structure of the delta and related features of the physicochemical characteristics of the habitat. The mean and interval values of the parameters were as follows: transparency was  $47.7 \pm 16.4$  (10–100) cm; in the surface water layer, the temperature was  $29.7 \pm 1.37$  (26.0–33.3) °C, electrical conductivity was  $5490.4 \pm 8392.5$  (133–33623)  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , total dissolved solids were  $3556.2 \pm 5445.8$  (86.5–21853), pH was  $7.6 \pm 0.3$  (6.9–8.4), and dissolved oxygen was  $4.8 \pm 1.05$  (3.0–8.9) mg/L; in the bottom water layer, the temperature was  $29.6 \pm 1.43$  (26.0–34.1) °C, electrical conductivity was  $7671.4 \pm 11193.2$  (125–37870)  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , total dissolved solids were  $4905.3 \pm 7199.8$  (78.0–24615.5), pH was  $7.6 \pm 0.3$  (6.9–8.2), and dissolved oxygen was  $4.6 \pm 1.00$  (2.6–7.7) mg/L. The zoning of the delta based on the knowledge of the environment makes it possible to organize the monitoring process in the most rational way. Following the results of the analysis of physicochemical parameters, the boundaries of zones with different environmental conditions that affect the formation of fish communities have been determined. The main contributing factors are salinity (3 zones), oxygen regime (3 zones), and runoff distribution (4 zones). The interrelation between the delta zoning according to the hydrochemical regime and the structural features of the fish communities at the family level has been found, which further supports the idea that such zoning must be taken into consideration when organizing monitoring surveys.

**Keywords:** Mekong, delta, ecological factors, water parameters, fish communities, zoning

## ВВЕДЕНИЕ

Дельты рек чрезвычайно важны для человеческой цивилизации, поскольку являются обширными центрами сельскохозяйственного производства. Они представляют собой социально-экологические системы, образующие сложные связи между человеком и природными экосистемами, управление и регулирование которых находятся под влиянием

социальных и экономических факторов, а также воздействием окружающей среды, и предоставляют ресурсы для поддержания всего местного населения.

В прибрежной зоне Азии насчитывается одиннадцать мегадельт площадью более 10000 км<sup>2</sup>, которые непрерывно формируются реками, берущими начало с Тибетского нагорья [1, 2]. Здесь

же располагаются семь крупнейших мегаполисов региона. Дельты являются одними из самых продуктивных в сельском хозяйстве и биологически разнообразных экосистем [3]. Они составляют 0,56 % мирового земного покрова, но в них проживает 4,1 % населения мира, причем в девяти азиатских мегадельтах проживает более 250 млн человек, что делает их одной из самых густонаселенных и быстро урбанизирующихся сред в мире [4–7].

Одной из крупнейших мегадельт Юго-Восточной Азии является дельта реки Меконг (площадь 46,7 тыс. км<sup>2</sup>). Она формируется при впадении реки в Восточное море Вьетнама. Рыболовство здесь занимает центральное место в жизни людей, особенно малообеспеченного сельского населения, проживающего в странах нижнего течения Меконга. Две трети из 70 млн человек в бассейне так или иначе занимаются рыболовством, которое составляет около 10 % ВВП Камбоджи и Лаосской Народно-Демократической Республики. В реке встречается около 1000 видов постоянно обитающих рыб и намного больше морских мигрантов, что делает ее фауну одной из самых богатых в мире [8]. Недавние оценки годового улова только от промыслового рыболовства превышают 2,5 млн т [9], при этом на долю дельты приходится более 30 % этого объема.

На продуктивность рек оказывает влияние ряд факторов. В частности, климатические изменения ведут к различным последствиям, таким как таяние снегов, повышение уровня моря и трансформация режима осадков, что в свою очередь влияет на гидрологию и качество вод Мирового океана и, следовательно, на характеристики водных биоценозов. Вполне вероятно, что непосредственное антропогенное воздействие на рыболовство, вызванное ростом населения, последствиями наводнений, увеличением водозабора, переменами в землепользовании и чрезмерным выловом рыбы, будет более весомым, чем влияние глобальных климатических изменений, хотя эти факторы тесно взаимосвязаны между собой благодаря деятельности человека.

Анализ воздействия сценариев изменения климата на сток Меконга [10] показал возможное увеличение максимального месячного стока на 35–41 % в бассейне и на 16–19 % в дельте и снижение минимального месячного стока на 17–24 % в бассейне и на 26–29 % в дельте. Усиление навод-

нений положительно повлияет на уловы рыбы, но сокращение среды обитания в засушливый сезон может сократить численность некоторых видов. Однако ожидается, что планируемые мероприятия по управлению водными ресурсами, в первую очередь строительство плотин, окажут противоположное воздействие на гидрологию, а именно — приведут к незначительному уменьшению стока в сезон дождей и значительному увеличению стока в сухой сезон [11]. Таким образом, в связи с наличием разнонаправленных трендов, результирующие процессы малопредсказуемы и требуют постоянных наблюдений.

Многим дельтам рек мира, в которых проживает более 500 млн человек, угрожают крупные наводнения и потеря земель в результате повышения относительного уровня моря [12]. Модели показывают, что даже незначительное повышение уровня моря на 20 см приведет к смещению изолиний уровня воды в дельте Меконга на 25 км в сезон половодья, а соленая вода будет двигаться дальше вверх по течению во время сухого сезона [13]. Перемещение океанических вод значительно изменит видовой состав рыбных промыслов, но, возможно, не нанесет ущерба общему улову рыболовства.

Гидрографическая сеть дельты включает в себя ряд водных объектов, значительно отличающихся своими характеристиками [14]. В нее входят: 1) естественные речные русла и устьевые протоки Меконга — реки Тиен и Хау, которые впадают в море восемью устьями: Кыатиеу, Кыадай, Балай, Хамлуонг, Кочиен, Кунгхау, Диньан и Чанде; 2) бассейн реки Вамко, протекающей параллельно к востоку от реки Тиен; 3) приливные реки полуострова Камау; и 4) густая сеть искусственных каналов различного уровня. Многоканальная эстуарная система вьетнамской дельты Меконга (ВМД) представляет собой сложную водную систему, которая играет важную роль в демпфировании амплитуды приливов вдоль эстуария (до 25 %) [15]. Благодаря этому на водные сообщества в разных районах дельты воздействует значительное количество различных природных и антропогенных экологических факторов, оказывающих влияние на их формирование и функционирование.

Проблема снижения биологического разнообразия и биоресурсного потенциала актуальна для всех подобных экосистем. В связи с высокой значимостью происходящих в дельтовых экосис-

темах процессов, организация биологического, в т. ч. ихтиологического, мониторинга крайне важна для сохранения биоразнообразия и рыбных запасов. Снижение численности, биомассы рыб и качества уловов уже достигло в дельте Меконга значительного уровня [8, 16]. Создание мониторинговой сети, охватывающей различные по своим свойствам районы дельты, позволит более достоверно моделировать происходящие в водных сообществах изменения и влиять на рациональное управление ресурсами.

Таким образом, целью работы является выделение различных по своим свойствам районов дельты Меконга в Социалистической Республике Вьетнам для дальнейшей организации долговременного мониторинга биоразнообразия, количественных и структурных характеристик сообществ и выявления реакций на различные факторы экологического воздействия.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на всем протяжении рек Тиен, Хау и устьевых рукавов Кыатэу,

Кыадай, Балай, Кочьен, Кунгхау, Диньан и Чанде в пределах Вьетнама (рис. 1).

Сбор материала осуществляли в периоды апрель–июнь 2018 г., январь–март и октябрь–ноябрь 2019 г., февраль–март, май–июнь и декабрь 2020 г., январь, май и декабрь 2021 г. и март–апрель 2022 г.

Сбор проб ихтиофауны проводили при помощи тралений донным тралом с металлической рамой (бимтрал). Ширина рамы трала составляла 4 м, высота — 0,4 м. К раме был прикреплен траловый мешок длиной 12 м из сетного полотна с ячейей 10 мм. Трал буксировали по дну при помощи рыбацкой моторной лодки с лебедкой. Каждое траление длилось около 20 минут и имело протяженность от 250 до 4400 м (в среднем 1500 м). Во время траления при помощи эхолота Garmin Striker контролировали глубину траления. По окончании траления трал поднимали на палубу лодки. Затем выловленную рыбу извлекали из трала, помещали в термостатические коробки со льдом и перевозили в полевую лабораторию для видового определения и проведения биологического анализа, включавшего

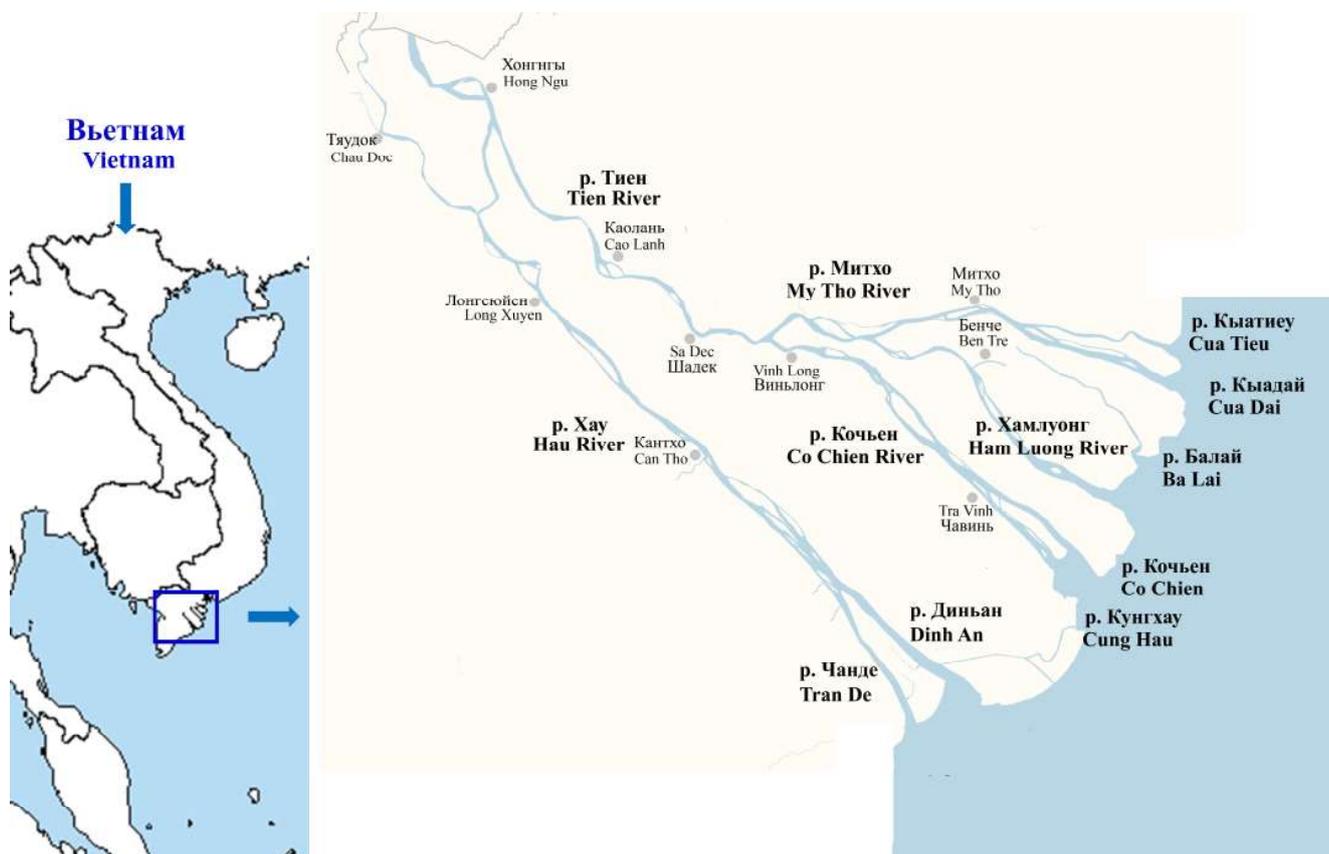


Рис. 1. Карта-схема района исследований

Fig. 1. Outline map of the investigated area

в т. ч. подсчет особей каждого вида и определение их массы. Всего были проанализированы результаты 743 тралений, содержащих 105190 экз. рыб.

Физико-химические параметры среды определяли по окончании каждого траления в придонном (b) и поверхностном (s) слоях воды. Соленость (S), температуру (T), общее содержание солей (TDS), электропроводность (SPS), pH и содержание растворенного кислорода ( $O_2$ ) измеряли при помощи мультиметров TDS-3, HI-9813-6 pH/EC/TDS/°C, YSI ProPlus, оксиметра HANNA HI 9146-04 и рефрактометра PAL-06S. Всего было проведено 673 замера температуры, 693 — солености, 414 — содержания кислорода, 243 — pH, TDS и SPS.

Достоверность различий для разных пространственных участков дельты и для гидрологических сезонов находили с применением непараметрического критерия Краскела–Уоллиса, т. к. проверка распределения исходных данных на нормальность с помощью теста Колмогорова–Смирнова и критерия Шапиро–Уилка показала отрицательный

результат. Для определения структурных характеристик рыбных сообществ использовали методы многомерной статистики на основе индекса несходства Брея–Кертиса. Статистическая обработка материалов проводилась в программе Statistica 10.

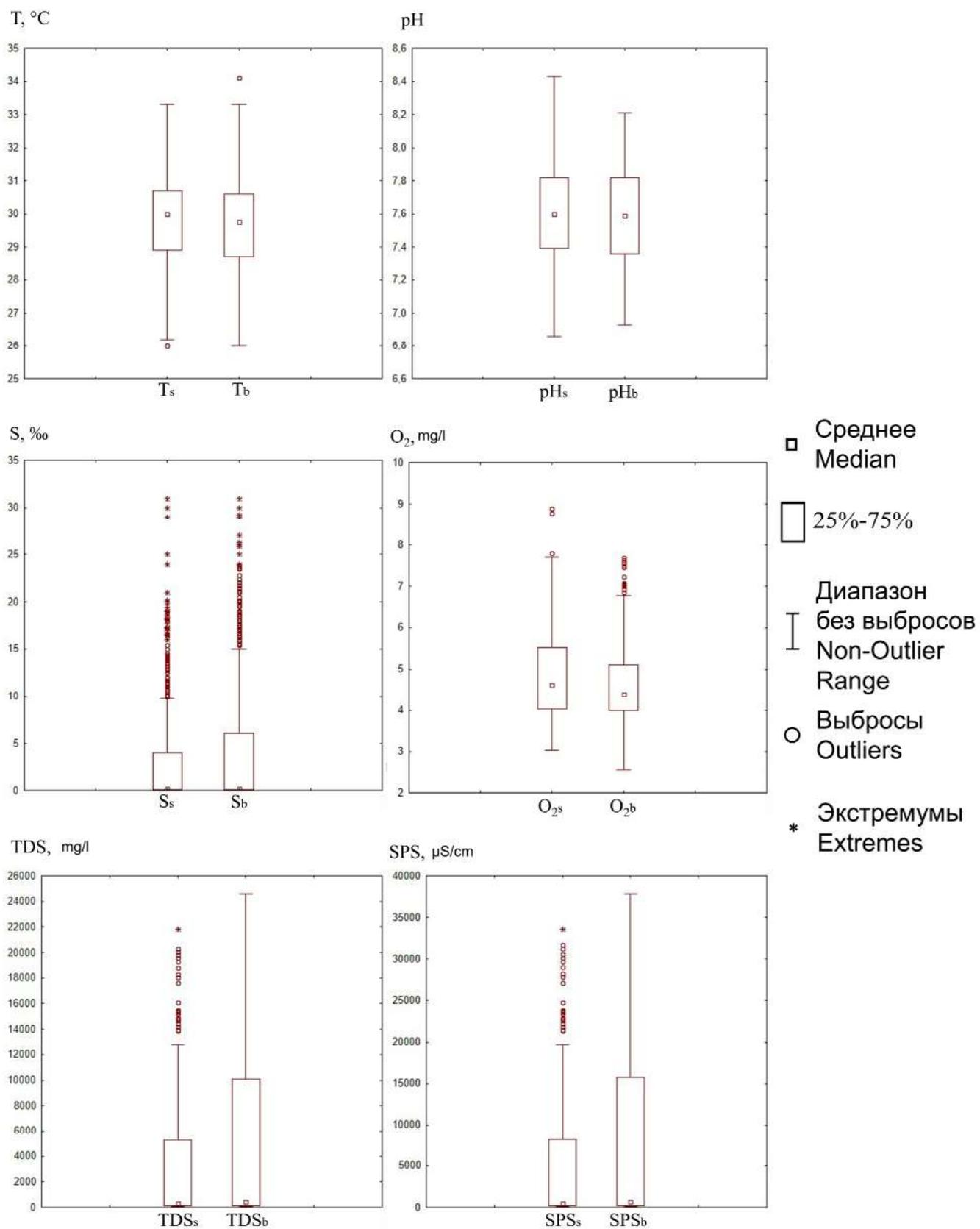
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Большинство параметров среды демонстрировали значительную вариабельность в пределах ВМД (таблица, рис. 2).

К наиболее сильно меняющимся в пространстве и времени параметрам следует отнести соленость воды и связанные с ней показатели общего содержания солей и электропроводности, значения которых закономерно увеличивались по направлению к морю (рис. 3). При этом наибольшие дистанции продвижения морских вод и изменения соответствующих параметров отмечались в придонном слое (рис. 2, 3).

Основные характеристики физико-химических параметров воды в дельте Меконга  
Main characteristics of the physicochemical parameters of the water in the Mekong Delta

Параметр Parameter	Минимум Minimum	Максимум Maximum	Среднее значение Mean value	Медианное значение Median value	Модальное значение Modal value
$T_s$ , °C	26	33,3	29,7	30	30
$T_b$ , °C	26	34,1	29,6	29,75	30,3
$S_s$ , ‰	0,05	31	3,2	0,14	0,1
$S_b$ , ‰	0,05	31	4,5	0,19	0,1
$O_{2s}$ , мг/л $O_{2s}$ , mg/L	3	8,9	4,8	4,6	4
$O_{2b}$ , мг/л $O_{2b}$ , mg/L	2,6	7,7	4,6	4,4	4,2
$O_{2s}$ , %	39,3	98,2	64,9	64,7	53,9
$O_{2b}$ , %	39,4	93	61,9	60,6	51,8
$SPS_s$ , мкСм/см $SPS_s$ , $\mu$ S/cm	133	33623	5490,4	498	234,9
$SPS_b$ , мкСм/см $SPS_b$ , $\mu$ S/cm	125	37870	7671,4	657	235
$TDS_s$ , мг/л $TDS_s$ , mg/L	86,45	21853	3556,2	325	152,75
$TDS_b$ , мг/л $TDS_b$ , mg/L	78	24616	4905,3	429	152,75
$pH_s$	6,9	8,4	7,6	7,6	8
$pH_b$	6,9	8,2	7,6	7,59	7,9



**Рис. 2.** Статистические характеристики параметров среды поверхностного и придонного слоев воды

**Fig. 2.** Statistical characteristics of the environmental parameters of the surface and bottom water layers

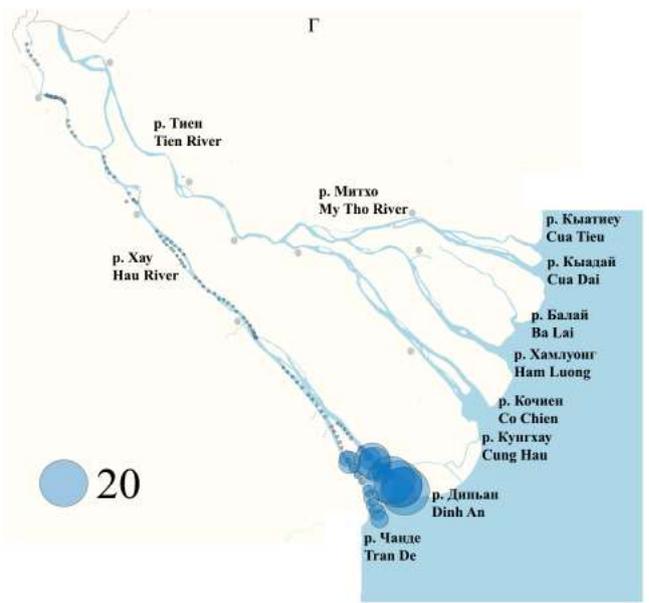
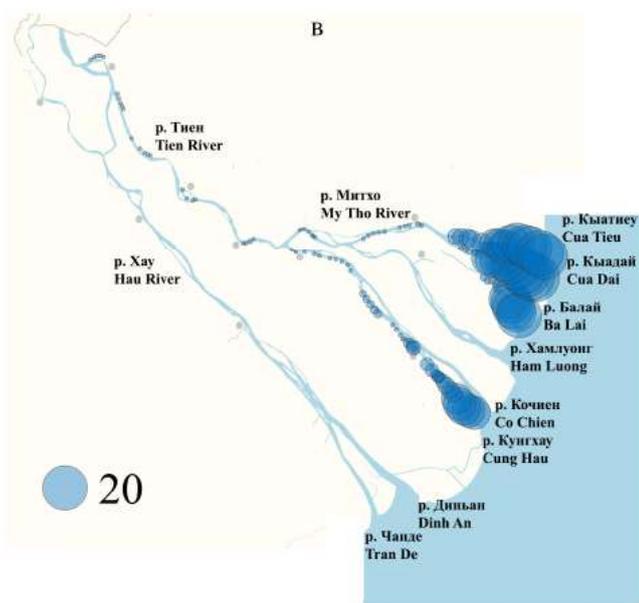
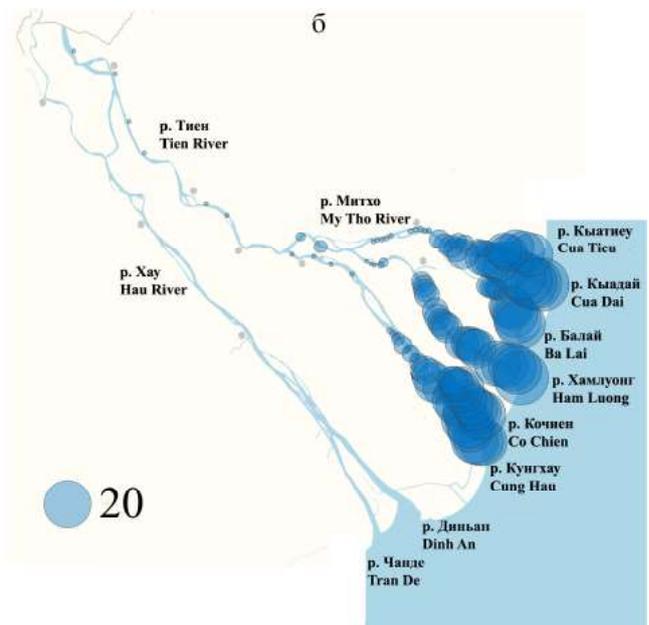
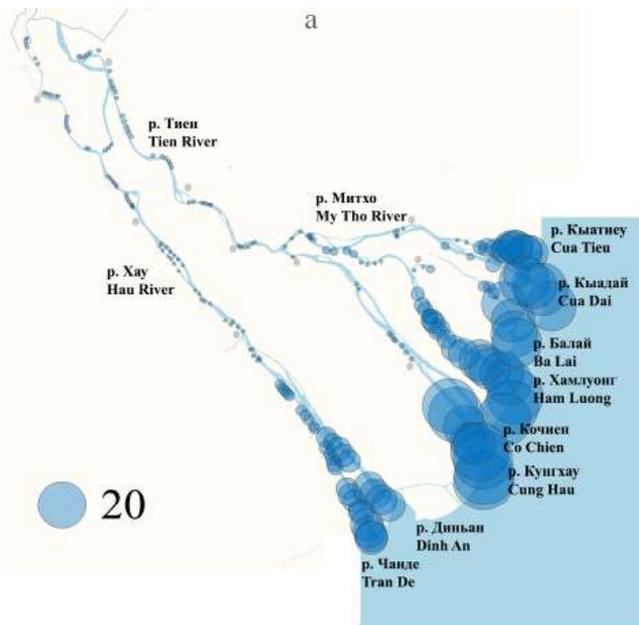
Температура придонного слоя воды в дельте Меконга менялась в пределах около 8 °С, поверхностного — 7 °С в соответствии с годовым ходом (рис. 4). Минимальные значения наблюдались в декабре–январе, а к середине паводкового периода температура увеличивалась до максимальных значений; кроме того, незначительный рост температуры отмечался в середине дня.

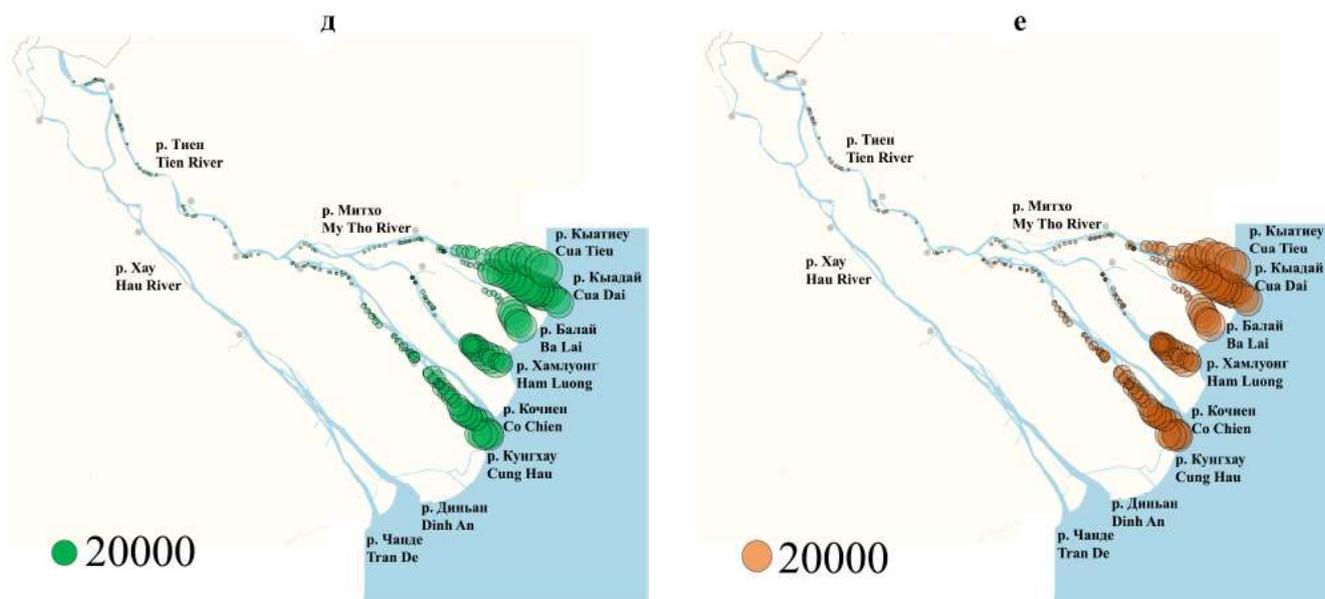
Вариации температуры придонного слоя имели значимый на уровне  $p < 0,05$  пространственный тренд ( $H(1, N=572)=9,102215; p=0,0026$ ) между эстуарной зоной устьевых рукавов и остальной частью дельты; для поверхностного слоя воды таких различий не наблюдалось.

Водородный показатель воды придонного слоя был в целом близок к нейтральному (7,6). В нижней части устьевых рукавов его значение в среднем было достоверно выше (7,7), чем в остальной части (7,5) ( $H(1, N=337)=7,069280; p=0,0078$ ), но всюду соответствовало физиологическому диапазону водных животных.

Таким образом, по таким характеристикам, как температура и рН придонного слоя воды, вся система разделяется на две области — эстуарную часть с затоком морских вод и остальную ВМД.

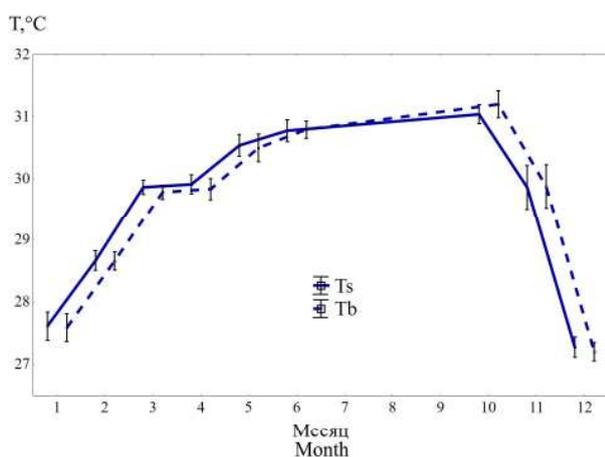
Низкие значения содержания растворенного кислорода в придонном слое воды и степени насыщения (таблица) указывали на присутствие





**Рис. 3.** Пространственное распределение физико-химических параметров воды придонного слоя: солености (‰) в меженный период 2018–2019 гг. (а), в меженный период 2020–2021 гг. в системе р. Тиен (б), в меженный период 2022 г. в рр. Тиен, Кыатиену, Кыадай, Балай, Кочьен и Кунгхау (в), в паводковый период 2019 г. в системе р. Хау (г); электропроводности (мкСм/см) (д) и общего содержания солей (части на млн) (е) в системе р. Тиен в меженный период 2020–2021 гг.

**Fig. 3.** Spatial distribution of physical and chemical parameters of the water in the bottom layer: salinity (‰) during the low-water season of 2018–2019 (a), during the low-water season of 2020–2021 in the Tien River system (б), during the low-water period of 2022 in the Tien, Cua Tieu, Cua Dai, Ba Lai, Co Chien, and Cung Hau Rivers (в), and during the flood period of 2019 in the Hau River system (г); electrical conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) (д) and total dissolved solids (ppt) (е) in the Tien River during the 2020–2021 low-water season



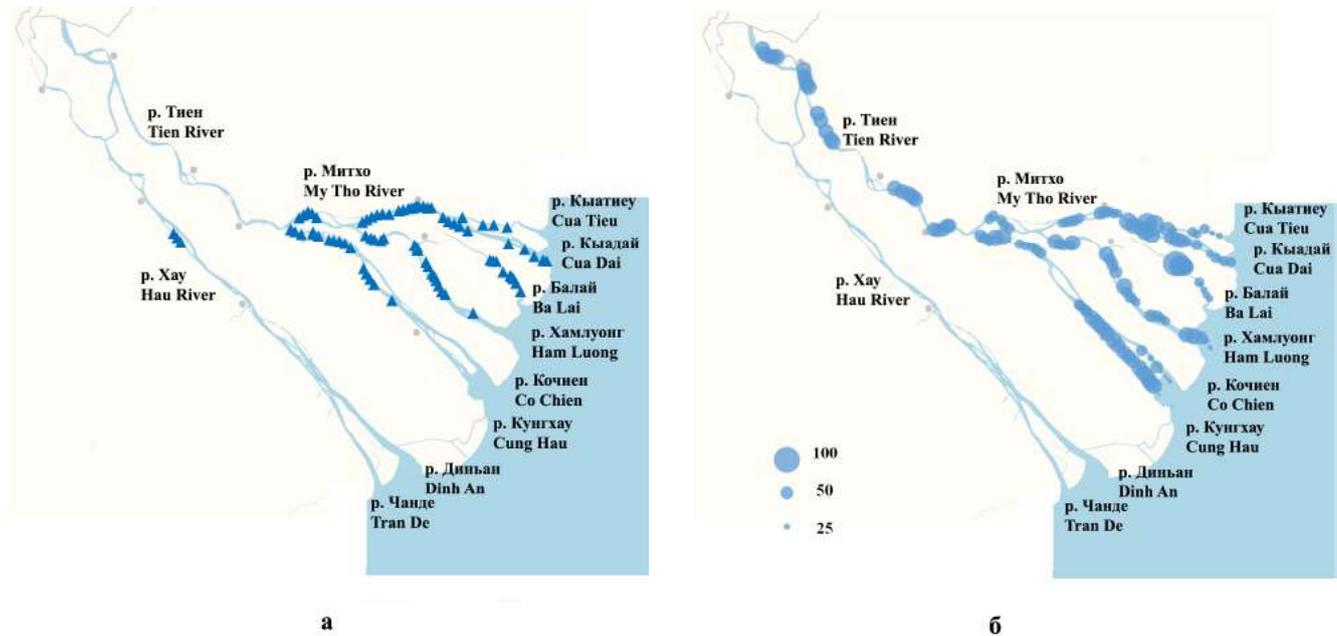
**Рис. 4.** Годовой ход температуры придонного ( $T_b$ ) и поверхностного ( $T_s$ ) слоев воды в дельте Меконга по результатам экспедиционных исследований 2018–2022 гг.

**Fig. 4.** Annual variation in the temperature of the bottom ( $T_b$ ) and surface ( $T_s$ ) water layers in the Mekong Delta based on the results of field surveys in 2018–2022

локального дефицита, пространственная локализация которого была приурочена к трем рукавам дельты (Кыатиену, Кыадай и Балай), а также к верхней части проток системы реки Тиен (Кочьен, Хамлуонг и Митхо) (рис. 5а).

В реке Хау и ее устьевых рукавах единственным местом, где наблюдался низкий уровень растворенного кислорода, был район острова в провинции Кантхо, отделяющего от главного русла мелководную и сильно заиленную протоку. В составе рыбных сообществ этой протоки присутствовали преимущественно карповые рыбы (*Cyprinidae*), в отличие от прочих участков русла этого района, где преобладали циноглоссы *Cynoglossus feldmanni*, *C. microlepis*, горбыль *Boesemania microlepis*, пангасиевые сомы (*Pangasiidae*).

Таким образом, в устьевых рукавах с различным объемом стока складываются различные по обеспечению кислородом условия для донно-придонных рыб и других гидробионтов. Особую группу обра-



**Рис. 5.** Пространственное распределение зон с содержанием кислорода в придонном слое воды менее 4 мг/л (а) и прозрачности воды, см (б) по результатам экспедиционных исследований 2018–2022 гг.

**Fig. 5.** Spatial distribution of zones with an oxygen content in the bottom water layer of less than 4 mg/L (a) and water transparency, cm (б) based on the results of field surveys in 2018–2022

зуют три маловодные протоки, объем стока в которых не превышает 6 % от общего. В системе реки Тиен выделяется зона, включающая реки Митхо, Кочьен и Хамлуонг в их верхней части.

Прозрачность вод Меконга в дельте, которая зависит в основном от концентрации взвешенных и растворенных в воде органических и неорганических веществ, в системе реки Тиен по нашим данным составляла 0,1–1 м. При этом показатель снижался по направлению к устьевому взморью (рис. 5б). Среднеголетние значения стока взвешенных наносов, стока растворенных веществ и мутности воды в настоящее время составляют 96 млн т/год, 57 млн т/год и 170 г/м<sup>3</sup>, соответственно [17]; значения этих параметров быстро снижаются. Это может сказаться на поведении большинства рыб дельты, жизненные циклы которых проходят в условиях низкой освещенности, и повлиять на них как стрессовый фактор.

Соленость воды входит в группу экологических факторов, влияющих на формирование того или иного типа водной экосистемы дельты. В ряде ситуаций, спровоцированных как антропогенным воздействием (сокращение объема стока речных вод в эстуарий в результате зарегулирова-

ния водотоков, изоляция части бассейна дамбой или плотиной), так и естественными причинами (затоки в эстуарий соленых океанических вод) соленость может выполнять роль лимитирующего экологического фактора, что совпадает с положениями концепции критической солености биологических процессов. Дельта Меконга, согласно подходам к типизации подобных систем, относится к дельтово-эстуарному типу или к русловым с устьевым расширением нижних частей рукавов дельт мезоприливным умеренно стратифицированным [18].

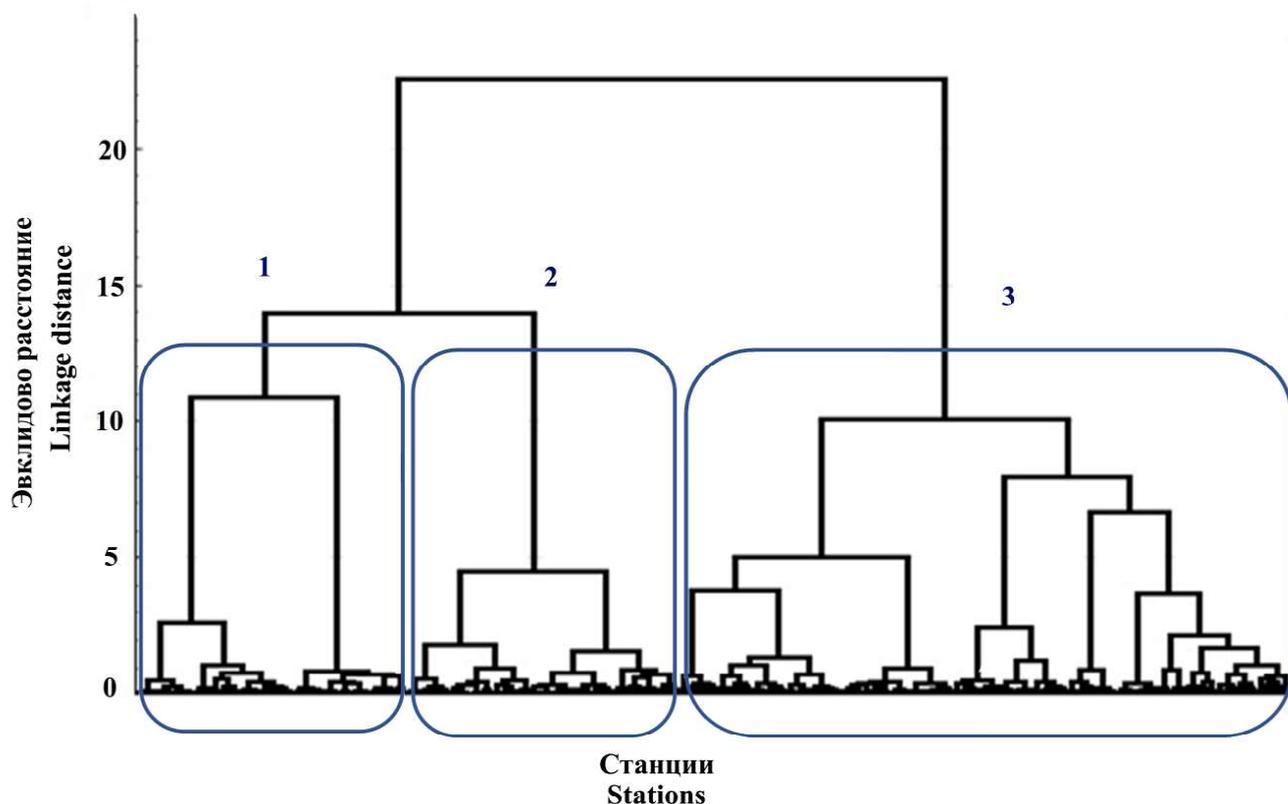
Существует несколько разных подходов для определения верхней границы эстуарного экотона [18] — по наибольшей дальности распространения приливных колебаний уровня, по максимальной дальности проникновения в реку осолоненных вод и по пределу действия того из видов морского влияния, который ощущается на большем удалении от моря. Удаленность приливных подъемов уровня Меконга [19] не позволяет использовать этот параметр в качестве критерия границы эстуария; среди прочих критериев определяющим являлась именно соленость. Морские воды в зависимости от гидрологического сезона и конкретных погодных условий поднимались по руслам дельты

на расстояние около 90 км, хотя обычно эта дистанция значительно меньше. Таким образом, если внешняя граница эстуарного экотона постоянно находилась в районе приустьевого взморья, его вершина смещалась на десятки километров. Нет единого мнения, какой уровень солености (2 ‰, 1 ‰ или 0,5 ‰) должен служить верхней границей зоны смешения и при каких гидрологических условиях она должна определяться, но при любом из подходов в системе реки Тиен эта зона лежит в пределах устьевых проток, не затрагивая главного русла реки, тогда как в реке Хау простирается по главному руслу до границ провинции Кантхо.

Таким образом, по критерию солености ВМД разделяется на три области — пресноводную часть, включающую большую часть главных русел рек Тиен и Хау, собственно эстуарный экотон с постоянно присутствующим градиентом солености миксогалинных вод и зону, в которой коле-

бания солености, вплоть до критической, происходят эпизодически, и где обычно присутствуют пресные воды (река Митхо, верхние части проток Кочиен и Хамлуонг). Границы последней установить наиболее сложно: она подвержена изменениям различного временного масштаба — суточным, сезонным, межгодовым, — а также влиянию прочих факторов. Однако эта зона хорошо выделяется по структуре сообществ населяющих ее рыб (рис. 6).

В результате группировки по показателям обилия основных семейств рыбные сообщества в дельте объединяются в три основных кластера на уровне, соответствующем значению меры несходства Брея–Кертиса около 0,5. Среди этих кластеров один охватывает сообщества пресноводной зоны, другой — эстуария, еще один, наиболее однородный — группу сообществ, локализованных в верхней части устьевых проток, где эпизо-



**Рис. 6.** Дендрограмма сходства рыбного населения на станциях исследований: 1 — пресноводные станции главных русел рр. Тиен и Хау, 2 — станции, локализованные преимущественно в верхней части устьевых проток, 3 — станции в эстуарии

**Fig. 6.** Dendrogram of the similarity of the fish population at the sampling stations: 1 — freshwater stations of the main channels of the Tien and Hau Rivers, 2 — stations, predominantly located in the upper part of the mouth channels, 3 — stations in the estuary

дически отмечались заходы солоноватых вод. К ценообразующим видам этой группы относились в основном пальцеперы (семейство Polynemidae), акизовые сомы (сем. Akysidae) и сом *Cephalocassis borneensis* (Bleeker, 1851). В пресноводной области доминирующими являлись циноглоссы *Cynoglossus microlepis*, *C. feldmanni*, карповые рыбы (Cyprinidae) и пангасиевые сомы (*Pangasius* spp.), в эстуарии — гренадерские анчоусы *Coilia reventischi* (Engraulidae), горбылевые (Sciaenidae), ариевые сомы *Arius maculatus*, *Osteogeneiosus militaris*, *Cryptarius truncatus*.

Помимо общих гидролого-гидрохимических характеристик окружающей среды, в качестве локальных, но весьма значимых факторов, оказывающих влияние на особенности формирования биотических сообществ в целом и ихтиоценов в частности, выступают различные виды антропогенного воздействия. Добыча песка и ила при помощи донных драг, уничтожение мангровых зарослей, наличие различных производств (по очистке и погрузке риса, обжигу кирпича, садковому выращиванию гидробионтов и пр.) в значительной степени меняют характер биотопов, что приводит к заметной деформации структуры рыбных сообществ. При этом, хотя количественный анализ таких воздействий затруднителен, учитывать их локализацию при организации мониторинговых исследований очень важно.

В настоящее время наибольшей угрозой для экосистемы бассейна Меконга является прогрессирующее развитие гидроэнергетики, для нужд которой уже построено 16 дамб и 47 плотин. Одним из отрицательных последствий перекрытия реки является уменьшение естественного стока, что в низовьях дельты провоцирует проникновение морских вод вверх по течению. Согласно существующим данным, до начала масштабных гидрологических преобразований река переносила около 160 млн т наносов в год [20], однако недавние результаты мониторинга показывают, что количество взвешенных наносов в бассейне нижнего Меконга сейчас снизилось до приблизительно 70 млн т в год [21]. К 2030 г. планируется реализовать до 136 проектов строительства дамб на всем протяжении Меконга, что приведет к сокращению поступления наносов в водах нижнего течения на 60–96 %. В результате этого, а также изменения климата, модели предсказывают для поймы реки Меконг сокращение отложений на 53–59 %, сниже-

ние поступления питательных веществ на 47–84 % и уменьшение средней чистой первичной продукции на 30–38 % [20, 22]. Кроме того, для большинства рыб и некоторых десятиногих ракообразных, населяющих Меконг, характерны продолжительные катадромные, диадромные и потамодромные миграции, осуществлению которых препятствуют плотины. Количество дамб и плотин в самом Вьетнаме невелико, но даже небольшая глухая дамба, построенная на р. Балай для предотвращения осолонения верхней части протоки, уже оказала влияние на структуру сообществ рыб и их миграции [8]. Здесь отмечалось аномальное распределение параметров и вместо плавного градиента наблюдались резкие скачкообразные изменения, в частности солености — от 1–4 до 16,5 ‰, в районе дамбы, перекрывающей реку для предотвращения засоления, сохранения пресной воды и водоснабжения жителей районов Чаутхань, Зонгчом и города Бенче. Открытие шлюзов дамбы с начала января до конца мая запланировано 2 раза в месяц по 1 дню, в июне, июле, ноябре и декабре — 2 раза в месяц по 2 дня, с августа по октябрь — 6 раз по 1–2 дня; в зависимости от фактических погодных условий график сброса воды может меняться. Резкие отличия наблюдались при этом в видовом составе гидробионтов выше и ниже плотины, и для некоторых из них, например, *Polynemus melanochir*, были отмечены аномально низкие численность и биомасса.

На распределение многих видов рыб, в т. ч. не только донных, оказывает влияние высокая загрязненность дна пластиковыми отходами. При среднем значении удельной биомассы рыб и десятиногих ракообразных около 2,7 кг/га, масса пластикового мусора в дельте в среднем составляет более 53 кг/га [23]. Наибольшие его концентрации обнаружены в районах населенных пунктов и плавучих поселков рыбоводных хозяйств. Скопление различных видов рыб вокруг мест концентрации пластика, которое было достоверно подтверждено [23], способствует деформации структуры локальных сообществ и нарушению процессов нагула.

Помимо этого, существует довольно большое количество различных локальных воздействий, способных отражаться на показателях разнообразия сообществ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В системе главных рек вьетнамской дельты Меконга условия обитания гидробионтов значи-

тельно различаются на разных участках акватории. Одним из главных факторов, определяющих экосистемные особенности, является соленость воды. Эстуарный экотон включает в себя устьевые протоки дельты, пресноводная область расположена в главных руслах рек Тиен и Хау, а между ними лежит особая по своим биотическим характеристикам зона смешения.

По гидрохимическим и гидрологическим характеристикам устьевые протоки эстуария разделяются на две группы — маловодные (Кыатиеу, Кыадай, Балай), объем стока которых в процентном выражении составляет менее 10 %, и прочие, значительно более полноводные. Наиболее заметное отличие между этими группами заключается в особенностях кислородного режима вод. В группе маловодных проток особое место по своим характеристикам занимает река Балай ввиду наличия на ней дамбы, препятствующей водообмену. Изменение естественного гидрохимического режима и нарушение процессов миграций гидробионтов привело к изменению их количественных характеристик и структуры сообществ вдоль русла реки.

Для эффективного гидробиологического и ихтиологического мониторинга при его планировании и организации необходимо предусмотреть сбор материала во всех выделенных на основании гидролого-гидрохимических характеристик районах с учетом локальных экологических воздействий.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность коллегам из Южного отделения Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра за всестороннюю помощь в проведении исследований.

Исследования выполнены в рамках темы Эколан Э-3.4 «Экосистема реки Меконг в условиях глобальных климатических изменений и антропогенного воздействия» и частично в рамках тем 121030100028-0 «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана» и 121051100109-1 «Систематика, разнообразие, биология и экология водных и околводных беспозвоночных, структура популяций и сообществ в континентальных водах».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Milliman J.D., Meade R.H. World-wide delivery of sediment to the oceans // *Journal of Geology*. 1983. Vol. 91, no. 1. Pp. 1–21. doi: 10.1086/628741.
2. Penland S., Kulp M.A. Deltas // *Encyclopedia of coastal science / M.L. Schwartz (Ed.)*. Dordrecht: Springer, 2005. Pp. 362–368.
3. Stark M.T. Early mainland Southeast Asian landscapes in the first millennium A.D. // *Annual Review of Anthropology*. 2006. Vol. 35. Pp. 407–432. doi: 10.1146/annurev.anthro.35.081705.123157.
4. Edmonds D., Caldwell R., Baumgardner S., Paola C., Roy S., Nelson A., Nienhuis J. A global analysis of human habitation on river deltas // *Geophysical Research Abstracts*. 2017. Vol. 19. e10832-1.
5. Woodroffe C.D., Nicholls R.J., Saito Y., Chen Z., Goodbred S.L. Landscape variability and the response of Asian megadeltas to environmental change // *Global change and integrated coastal management*. Dordrecht: Springer, 2006. Pp. 277–314.
6. Moorhouse H.L., Roberts L.R., McGowan S., Panizzo V.N., Barker P., Salehin M., Thu Nga Do, Phong Nguyen Thanh, Rahman M.F., Hosh T., Das S., Hackney C., Salgado J., Roy M., Opel A., Henderson A.C.G., Large A.R.G. Tropical Asian megadelta ponds: Important and threatened socio-ecological systems // *Geo: Geography and Environment*. 2021. Vol. 8, issue 2. e00103. doi: 10.1002/geo2.103.
7. Colding J., Barthel S. Exploring the social-ecological systems discourse 20 years later // *Ecology and Society*. 2019. Vol. 24, no. 1. e2. doi: 10.5751/ES-10598-240102.
8. Болтачев А.П., Карпова Е.П., Статкевич С.В., Нгуен Ван Тхинь, Чинь Тхи Лан Чи. Особенности количественного распределения рыб и десятиногих ракообразных в дельте реки Меконг в меженный период 2018 г. // *Морской биологический журнал*. 2018. Т. 3, № 4. С. 14–28. doi: 10.21072/mbj.2018.03.4.02.
9. Hurtle K.G., Bush S.R. Consumption in the Lower Mekong Basin as a measure of fish yield // *New approaches for the improvement of inland capture fishery statistics in the Mekong Basin. Proceedings of the ad-hoc expert consultation (Udon Thani, Thailand, 2–5 September, 2002)*. Bangkok: Food and Agriculture Organization of the United Nations Publ., Mekong River Commission Publ., 2003. Pp. 76–88.
10. Chu Thai Hoanh, Jirayoot K., Lacombe G., Srinetr V. Impacts of climate change and development on Mekong flow regime. First assessment — 2009 // *MRC Technical Paper*. 2010. No. 29. 104 p.
11. World Bank. Mekong regional water resources assistance strategy. Modelled observations on development scenarios in the Lower Mekong Basin. G. Podger, R. Beecham, D. Blackmore, C. Perry, R. Stein (Eds.). Vientiane, 2004. 142 p.

12. Syvitski J.P.M., Kettner A.J., Overeem I., Hutton E.W.H., Hannon M.T., Brakenridge G.R., Day J., Vörösmarty C., Saito Y., Giosan L., Nicholls R.J. Sinking deltas due to human activities // *Nature Geoscience*. 2009. Vol. 2, no. 10. Pp. 681–686. doi: 10.1038/ngeo629.
13. Wassmann R., Nguyen Xuan Hien, Chu Thai Hoanh, To Phuc Tuong. Sea level rise affecting the Vietnamese Mekong Delta: Water elevation in the flood season and implications for rice production // *Climatic Change*. 2004. Vol. 66. Pp. 89–107. doi: 10.1023/B:CLIM.0000043144.69736.b7.
14. Karpova E.P., Boltachev A.R., Ablyazov E.R., Kutsin D.N., Cu Nguyen Dinh, Truong Ba Hai, Nguyen Van Thinh, Trinh Thi Lan Tri. Spatial variations in fish abundance in the Mekong Delta // *Russian Journal of Ecology*. 2021. Vol. 52, no. 2. Pp. 146–154. doi: 10.1134/S1067413620050082.
15. Eslami S., Hoekstra P., Nguyen Trung Nam, Kantoush S.A., Doan Van Binh, Duc Dung Do, Tran Quang Tho, van der Vegt M. Tidal amplification and salt intrusion in the Mekong Delta driven by anthropogenic sediment starvation // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9, no. 1. e18746. doi: 10.1038/s41598-019-55018-9.
16. Brunier G., Anthony E.J., Goichot M., Provansal M., Dussouillez P. Recent morphological changes in the Mekong and Bassac river channels, Mekong delta: The marked impact of river-bed mining and implications for delta destabilisation // *Geomorphology*. 2014. Vol. 224. Pp. 117–191. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.07.009.
17. Koehnken L. Discharge Sediment Monitoring Project (DSMP) 2009–2013: Summary & analysis of results. Final report. Vientiane: Mekong River Commission Secretariat Publ., 2014. 126 p.
18. Михайлов В.Н., Горин С.Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей — эстуариев // *Водные ресурсы*. 2012. Т. 39, № 3. С. 243–257.
19. Нгуен Ван Кы. Устьевые области рек Вьетнама. Одесса: Астропринт, 2004. 339 с.
20. Li X., Liu J.P., Saito Y., Van Lap Nguyen. Recent evolution of the Mekong Delta and the impacts of dams // *Earth-Science Reviews*. 2017. Vol. 175. Pp. 1–17. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.10.008.
21. Baran E., Guerin E., Nasielski J. Fish, sediment and dams in the Mekong. How hydropower development affects water productivity and food supply. Penang: CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems (WLE) Publ., International Water Management Institute (IWMI) Publ., WorldFish Publ., 2015. 108 p.
22. Koelmans A.A., Besseling E., Foekema E., Kooi M., Mintenig S., Ossendorp B.C., Redondo-Hasselerharm P.E., Verschoor A., van Wezel A.P., Scheffer M. Risks of plastic debris: Unravelling fact, opinion, perception, and belief // *Environmental Science and Technology*. 2017. Vol. 51, no. 20. Pp. 11513–11519. doi: 10.1021/acs.est.7b02219.
23. Karpova E., Abliazov E., Statkevich S., Cu Nguyen Dinh. Features of the accumulation of macroplastic on the river bottom in the Mekong Delta and the impact on fish and decapods // *Environmental Pollution*. 2022. Vol. 297. e118747. doi: 10.1016/j.envpol.2021.118747.

## REFERENCES

1. Milliman J.D., Meade R.H. World-wide delivery of sediment to the oceans. *Journal of Geology*, 1983, vol. 91, no. 1, pp. 1–21. doi: 10.1086/628741.
2. Penland S., Kulp M.A. Deltas. In: *Encyclopedia of coastal science*. M.L. Schwartz (Ed.). Dordrecht: Springer, 2005, pp. 362–368.
3. Stark M.T. Early mainland Southeast Asian landscapes in the first millennium A.D. *Annual Review of Anthropology*, 2006, vol. 35, pp. 407–432. doi: 10.1146/annurev.anthro.35.081705.123157.
4. Edmonds D., Caldwell R., Baumgardner S., Paola C., Roy S., Nelson A., Nienhuis J. A global analysis of human habitation on river deltas. *Geophysical Research Abstracts*, 2017, vol. 19, e10832-1.
5. Woodroffe C.D., Nicholls R.J., Saito Y., Chen Z., Goodbred S.L. Landscape variability and the response of Asian megadeltas to environmental change. In: *Global change and integrated coastal management*. Dordrecht: Springer, 2006, pp. 277–314.
6. Moorhouse H.L., Roberts L.R., McGowan S., Panizzo V.N., Barker P., Salehin M., Thu Nga Do, Phong Nguyen Thanh, Rahman M.F., Ghosh T., Das S., Hackney C., Salgado J., Roy M., Opel A., Henderson A.C.G., Large A.R.G. Tropical Asian megadelta ponds: Important and threatened socio-ecological systems. *Geo: Geography and Environment*, 2021, vol. 8, issue 2, e00103. doi: 10.1002/geo2.103.
7. Colding J., Barthel S. Exploring the social-ecological systems discourse 20 years later. *Ecology and Society*, 2019, vol. 24, no. 1, e2. doi: 10.5751/ES-10598-240102.
8. Boltachev A.R., Karpova E.P., Statkevich S.V., Nguyen Van Thinh, Trinh Thi Lan Chi. Osobennosti kolichestvennogo raspredeleniya ryb i desyatinogikh rakoobraznykh v del'te reki Mekong v mezheny period 2018 g. [Characteristics of quantitative distribution of fish and decapod crustaceans in the Mekong Delta during the low-water season of 2018]. *Morskoy biologicheskiy zhurnal [Marine Biological Journal]*, 2018, vol. 3, no. 4, pp. 14–28. doi: 10.21072/mbj.2018.03.4.02. (In Russian).
9. Hortle K.G., Bush S.R. Consumption in the Lower Mekong Basin as a measure of fish yield. In: *New approaches for the improvement of inland capture fishery statistics in the Mekong Basin. Proceedings of the ad-hoc expert consultation (Udon Thani, Thailand, 2–5 September, 2002)*. Bangkok: Food and Agriculture Organization of the United Nations Publ., Mekong River Commission Publ., 2003, pp. 76–88.

10. Chu Thai Hoanh, Jirayoot K., Lacombe G., Srinetr V. Impacts of climate change and development on Mekong flow regime. First assessment — 2009. *MRC Technical Paper*, 2010, no. 29, 104 p.
11. World Bank. Mekong regional water resources assistance strategy. Modelled observations on development scenarios in the Lower Mekong Basin. G. Podger, R. Beecham, D. Blackmore, C. Perry, R. Stein (Eds.). Vientiane, 2004, 142 p.
12. Syvitski J.P.M., Kettner A.J., Overeem I., Hutton E.W.H., Hannon M.T., Brakenridge G.R., Day J., Vörösmarty C., Saito Y., Giosan L., Nicholls R.J. Sinking deltas due to human activities. *Nature Geoscience*, 2009, vol. 2, no. 10, pp. 681–686. doi: 10.1038/ngeo629.
13. Wassmann R., Nguyen Xuan Hien., Chu Thai Hoanh, To Phuc Tuong. Sea level rise affecting the Vietnamese Mekong Delta: Water elevation in the flood season and implications for rice production. *Climatic Change*, 2004, vol. 66, pp. 89–107. doi: 10.1023/B:CLIM.0000043144.69736.b7.
14. Karpova E.P., Boltachev A.R., Ablyazov E.R., Kutsin D.N., Cu Nguyen Dinh, Truong Ba Hai, Nguyen Van Thinh, Trinh Thi Lan Tri. Spatial variations in fish abundance in the Mekong Delta. *Russian Journal of Ecology*, 2021, vol. 52, no. 2, pp. 146–154. doi: 10.1134/S1067413620050082.
15. Eslami S., Hoekstra P., Nguyen Trung Nam, Kantoush S.A., Doan Van Binh, Duc Dung Do, Tran Quang Tho, van der Vegt M. Tidal amplification and salt intrusion in the Mekong Delta driven by anthropogenic sediment starvation. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, no. 1, e18746. doi: 10.1038/s41598-019-55018-9.
16. Brunier G., Anthony E.J., Goichot M., Provansal M., Dussouillez P. Recent morphological changes in the Mekong and Bassac river channels, Mekong delta: The marked impact of river-bed mining and implications for delta destabilisation. *Geomorphology*, 2014, vol. 224, pp. 117–191. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.07.009.
17. Koehnken L. Discharge Sediment Monitoring Project (DSMP) 2009–2013: Summary & analysis of results. Final report. Vientiane: Mekong River Commission Secretariat Publ., 2014, 126 p.
18. Mikhailov V.N., Gorin S.L. New definitions, regionalization, and typification of river mouth areas and estuaries as their parts. *Water Resources*, 2012, vol. 39, no. 3, pp. 247–260. doi: 10.1134/S0097807812030050.
19. Nguyen Van Cu. Ust'evye oblasti rek V'etnama [Estuary areas of the rivers of Vietnam]. Odesa: Astroprint, 2004, 339 p. (In Russian).
20. Li X., Liu J.P., Saito Y., Van Lap Nguyen. Recent evolution of the Mekong Delta and the impacts of dams. *Earth-Science Reviews*, 2017, vol. 175, pp. 1–17. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.10.008.
21. Baran E., Guerin E., Nasielski J. Fish, sediment and dams in the Mekong. How hydropower development affects water productivity and food supply. Penang: CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems (WLE) Publ., International Water Management Institute (IWMI) Publ., WorldFish Publ., 2015, 108 p.
22. Koelmans A.A., Besseling E., Foekema E., Kooi M., Mintenig S., Ossendorp B.C., Redondo-Hasselerharm P.E., Verschoor A., van Wezel A.P., Scheffer M. Risks of plastic debris: Unravelling fact, opinion, perception, and belief. *Environmental Science and Technology*, 2017, vol. 51, no. 20, pp. 11513–11519. doi: 10.1021/acs.est.7b02219.
23. Karpova E., Ablyazov E., Statkevich S., Cu Nguyen Dinh. Features of the accumulation of macroplastic on the river bottom in the Mekong Delta and the impact on fish and decapods. *Environmental Pollution*, 2022, vol. 297, e118747. doi: 10.1016/j.envpol.2021.118747.

Поступила 09.08.2022

Принята к печати 27.09.2022