

УДК 574.589

## ДИНАМИКА МАНГРОВЫХ ЛЕСОВ ДЕЛЬТЫ МЕКОНГА (ВЬЕТНАМ) С 1988 ПО 2018 ГОД

© 2020 г. Тон Шон<sup>a, b</sup>, Д. В. Добрынин<sup>c</sup>, В. О. Мокиевский<sup>d, \*</sup>

<sup>a</sup>Университет Донг Хап, Каолань, Вьетнам

<sup>b</sup>МФТИ ФАКИ, Москва, Россия

<sup>c</sup>Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>d</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: vadim@ocean.ru

Поступила в редакцию 04.09.2019 г.

После доработки 06.03.2020 г.

Принята к публикации 06.04.2020 г.

Динамика площади мангровой растительности в семи провинциях дельты Меконга (Вьетнам) оценена за период с 1988 по 2018 г. Для анализа использованы данные дистанционного зондирования, полученные с помощью космических программ Landsat-4 (1988–1989) и Landsat-8 (2017–2018), результаты изучения видимого (0.53–0.60 мкм), ближнего инфракрасного (0.53–0.60 мкм) и коротковолнового инфракрасного (0.53–0.60 мкм) спектральных диапазонов. Общая площадь мангровой растительности по данным съемки 1988 г. была равна 111.01 тыс. га, к 2018 г. она сократилась на треть – до 75.80 тыс. га. Суммарные потери составили 35.21 тыс. га, а скорость деградации мангровой растительности – около 1% в год в среднем за 30 лет. С учетом территориального перераспределения мангровой растительности за это время, ненарушенные участки леса, сохранившиеся в прежних границах, имеют площадь 36.4 тыс. га. Основными выявленными причинами сокращения мангровой растительности явились ее замещение прудами аквакультуры и абразия берегов.

**Ключевые слова:** мангры, мангровые леса, Вьетнам, дельта Меконга, природная и антропогенная динамика и трансформация экосистем, площадь лесов, дистанционное зондирование

DOI: 10.31857/S2587556620040123

Мангровые леса – обязательный компонент прибрежных экосистем тропического пояса. Их таксономическое разнообразие невелико: в настоящих манграх произрастает около 60 видов деревьев и кустарников [22]. Экосистемы мангров отличаются высокой продуктивностью [13], играют важную роль в стабилизации и укреплении берегов [2, 16], защищают побережье от разрушительных штормовых волн [6], служат местом нагула для молодежи многих видов рыб и беспозвоночных [19, 32]. С мангровыми лесами ассоциирован ряд видов биоты, для которых они служат единственным или основным биотопом [15]. Экосистемы мангров важны для экономики прибрежных зон, а сами они и ассоциированные с ними виды животных – важный ресурс в хозяйстве тропических стран [12].

Современная трансформация побережий Вьетнама [7] негативно отражается и на состоянии мангров [26]. По некоторым оценкам, скорость исчезновения мангровых лесов максимальна среди всех типов экосистем, выше даже, чем для дождевых тропических лесов. Скорость ис-

чезновения мангровых лесов в мире оценивается в пределах от 0.6 до 2% площади в год [21, 25].

Во Вьетнаме мангровые леса сосредоточены в двух районах – на севере, в дельте р. Красной, и на юге, в дельте р. Меконга. Южные мангры отличаются относительно высоким видовым разнообразием (39 видов настоящих мангров [23]) и занимают наибольшую площадь – не менее 54% от суммарной площади мангровых лесов во Вьетнаме [31]. Учитывая большую роль, которую мангры играют в экономике прибрежной зоны южного Вьетнама, исследования мангровой растительности ведутся весьма интенсивно. Однако, большинство исследований сосредоточено на отдельных участках мангровой зоны, полной оценки динамики мангровой растительности для всей дельты Меконга не проводилось. Наиболее полный обзор состояния этих экосистем Вьетнама опубликован более 25 лет назад [12]. Авторы последней по времени сводки по манграм Вьетнама [28] при оценке площади ссылаются на этот же источник. Общая площадь мангров для южного побережья Вьетнама от г. Вунгтау до г. Хатьен на

границе с Камбоджей оценивалась для 1980-х годов в 191.8 тыс. га. Оценка, выполненная в рамках дистанционного анализа мангров Юго-Восточной Азии в 1997–1998 гг. [5], дает для того же района несколько большую цифру – 210 тыс. га. В обзоре ФАО [9], площадь мангров всего Вьетнама оценивается в 157 тыс. га для 2000–2005 гг. Ричардс и Фрисс [18], опираясь, в основном на данные предыдущих спутниковых съемок [10], оценивают общую площадь мангров во Вьетнаме в 215.0 тыс. га на 2000 г. Таким образом, оценки общей площади мангровых лесов в дельте Меконга существенно различаются, а их сравнение по годам затруднено из-за быстро меняющейся картины пространственного распределения.

Большое число исследований (более 30) для оценки площади и динамики вьетнамских мангров выполнено в последние десятилетия в различных районах с использованием спутниковых методов [28]. Однако все эти работы выполнены на отдельных участках и не дают полной картины современного распределения мангровых лесов по региону в целом. Оценки скорости исчезновения мангров по этим данным для отдельных районов различаются в несколько раз – от 2–3 до 60–70% за три десятилетия [28].

В нашей статье обсуждаются результаты анализа динамики мангровой растительности южного Вьетнама с 1988 по 2018 гг., выполненного на основе серий спутниковых снимков прибрежного пояса с пространственным разрешением в 0.1 га. Это позволило выявить картину современного распространения мангровых лесов и сопоставить скорости процессов их деградации и восстановления в дельте Меконга.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки темпов пространственной динамики мангровых зарослей были использованы спутниковые снимки космических программ *Landsat 4* и *Landsat 8*. Их архивы за 4 десятилетия находятся в открытом для научных исследований доступе. Нами были использованы космические изображения двух периодов. Снимки камеры ТМ спутника *Landsat-4* за 1988–1989 гг. и данные прибора OLI спутника *Landsat-8* за 2017–2018 гг. (табл. 1). В тексте снимки первой группы обозначены как 1988 г., второй – как 2018 г. Были выбраны снимки с минимальной площадью облачности в кадрах: от 0 и до 7%. Пространственное разрешение всех спутниковых снимков, вовлеченных в анализ, составляло 30 м на пиксель. Общая исследованная площадь в пределах снимков составила 434.12 тыс. га.

Классификация изображений в целях выявления мангровой растительности на космических снимках проведена на основании спектральных

признаков дешифрирования. Предварительная оценка информативности показала предпочтительность обработки спутниковых изображений видимого (0.53–0.60 мкм), ближнего инфракрасного (0.53–0.60 мкм) и коротковолнового инфракрасного (0.53–0.60 мкм) спектральных диапазонов. Тематическая обработка цифровых изображений в этих спектральных диапазонах позволила провести разделение ландшафтов мангровой зоны на пять категорий:

- 1) мангровая растительность (лесопокрытая площадь >10%, включая древесную и кустарниковую растительность);
- 2) водная поверхность (реки, озера и морская акватория прибрежной зоны);
- 3) сельскохозяйственные земли (рисовые поля, плантации овощей, кустарниковых и древесных многолетних культур и т.д.);
- 4) аквакультура (искусственные водоемы и комплексы гидротехнических сооружений для выращивания креветок, крабов и рыбы);
- 5) другие земли (населенные пункты, дороги, пустоши).

Геометрическая трансформация и тематическая обработка спутниковых изображений проводилась в программе *SCANEX Image Processor v 5.1.46*. Для формирования обучающей выборки были созданы векторные маски объектов, ограничивающие образы классов мангровой растительности и ее антропогенных аналогов, с наиболее типичными спектральными характеристиками, выявленные и верифицированные в процессе полевых изысканий. Дальнейшая тематическая обработка изображения проводилась методом управляемой классификации на заданное число классов. Результаты прошли векторизацию и генерализацию с исключением из анализа объектов с площадью менее 100 м<sup>2</sup>. Создание серий тематических карт и анализ динамики площадей выполнен в программе *ArcGIS v.10*. Первоначально методика была отработана для территории провинции Камау [1].

Предварительное полевое обследование территории было проведено в марте 2018 г. Результаты тематической обработки спутниковых снимков были верифицированы натурным обследованием в феврале–марте 2019 г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Площадь мангров в 7 провинциях дельты Меконга по данным съемки 1988 г. составила 111.1 тыс. га (табл. 2). Более половины (70.0 тыс. га или 63%) мангровых лесов были сосредоточены в южной провинции – Камау (рис. 1). Провинция Чавинь на восточном побережье занимала второе

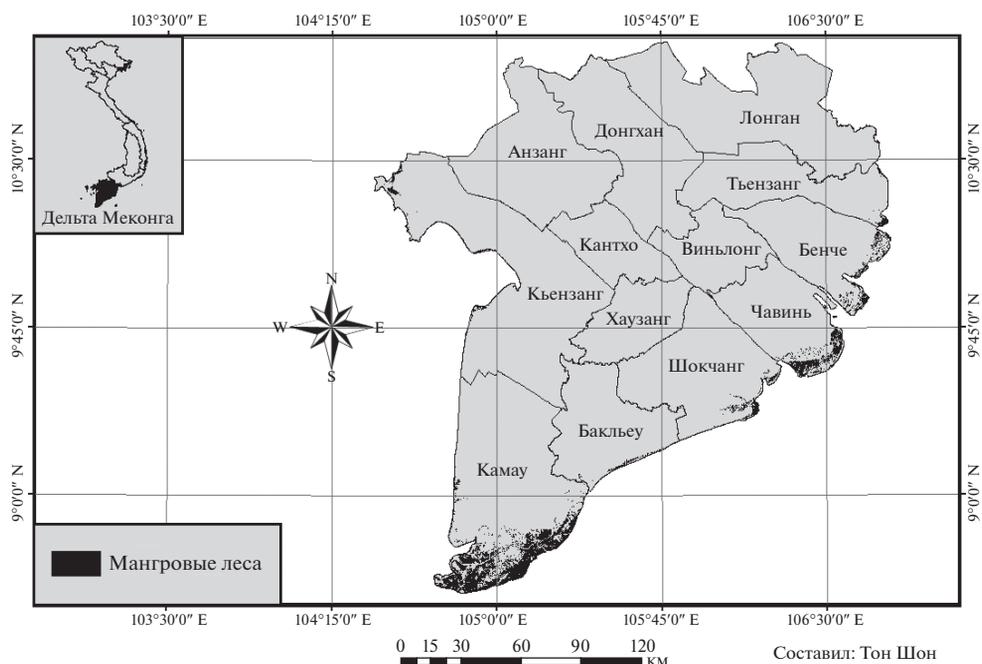
**Таблица 1.** Спутниковые снимки Ландсат, использованные в анализе

1988–1989 гг., Landsat-4			
Код снимка	Облачность	Качество фотографии	Дата
LT05_L1TP_125053_19880130_20170209_01_T1	1%	7	30/1/1988
LT05_L1TP_125054_19890406_20170204_01_T1	1%	7	6/4/1989
LT05_L1TP_126053_19880309_20170209_01_T1	4%	9	9/3/1988
LT04_L1GS_126054_19890131_20170204_01_T2	0%	9	31/1/1989
2017–2018 гг., Landsat-8			
Код	Облачность	Качество фотографии	Дата
LC08_L1TP_125053_20181031_20181031_01_RT	6.25%	9	31/10/2018
LC08_L1TP_125054_20170214_20170228_01_T1	8.83%	9	14/2/2017
LC08_L1TP_126053_20180224_20180308_01_T1	2.11%	9	24/2/2018
LC08_L1TP_126054_20180312_20180320_01_T1	7.42%	9	12/3/2018

место (15.2 тыс. га или 14%). Наименьшие площади выявлены в северо-восточных провинциях: Тьензянг и Бакльеу, чуть более 1.5 тыс. га в каждой (1.5–1.7% от общей площади мангровых зарослей).

К 2018 г. площадь мангров сократилась на треть: суммарная площадь мангровых зарослей в семи провинциях была равна 75.8 тыс. га (68% от площади на 1988 г.). Суммарные потери составили 35.2 тыс. га. Интенсивность изменений и их направление были различны на разных участках

побережья дельты. Около 70% мангровых зарослей было утрачено в этот период в провинции Чавинь, более 40% – в провинции Кьензянг; в 4 провинциях площадь потерь составляла от 17 до 35%. Небольшие по площади мангры провинции Сокчанг потеряли за 30 лет всего 6%, а в провинции Бакльеу площадь земель под манграми, наоборот, увеличилась более чем в полтора раза. К 2018 г., по-прежнему, самой богатой манграми провинцией остается южная – Камау (рис. 2), а самыми бедными – Бакльеу и Тьензянг. Провин-

**Рис. 1.** Мангровые леса в дельте Меконга в 1988 г.

**Таблица 2.** Изменения площади мангровой растительности в дельте Меконга по данным спутниковой съемки в 1988–2018 гг.

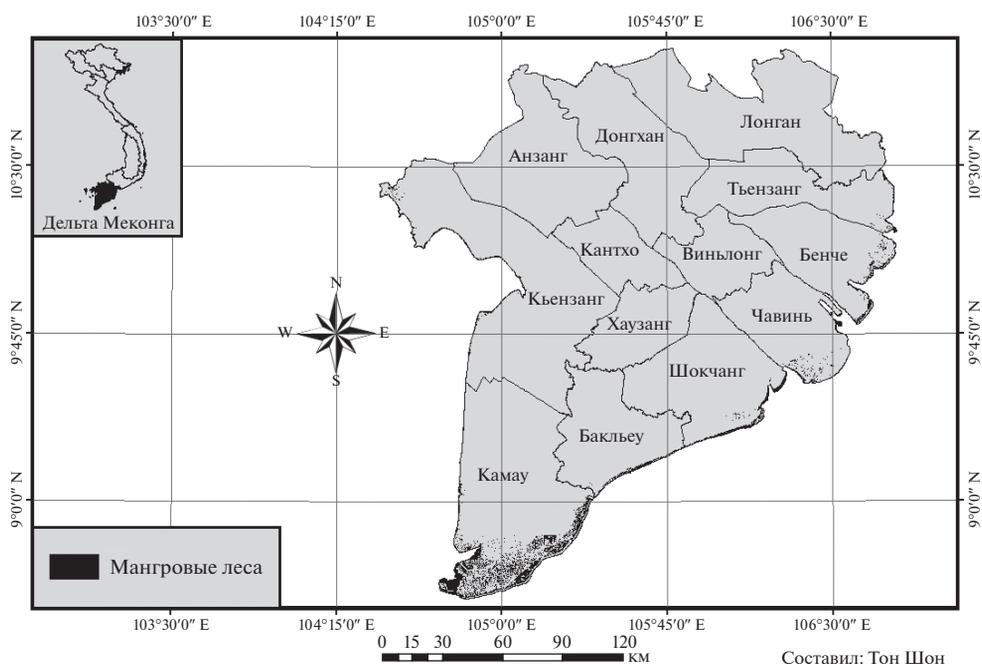
№	Провинция	Без изменений (га)	Изменение площади (га)		Площадь мангров в 1988 г.		Площадь мангров в 2018 г.		Изменение площади с 1988 по 2018 (га)
			Мангры в другие типы земель	Другие типы земель в мангры	га	%	га	%	
1	Кьензянг	1631.5	6587.6	3023.0	8219.2	7.40	4654.5	6.14	–3564.7
2	Камау	28204.8	41891.2	23209.6	70096.0	63.15	51414.5	67.83	–18681.6
3	Бакльеу	832.9	815.9	1958.0	1648.7	1.49	2790.9	3.68	1142.1
4	Сокчанг	1488.3	4573.8	4218.3	6062.1	5.46	5706.6	7.53	–355.5
5	Чавинь	1792.6	13383.4	2704.7	15176.0	13.67	4497.3	5.93	–10678.7
6	Бенче	2009.7	5946.3	3183.4	7955.9	7.17	5193.0	6.85	–2762.9
7	Тьензянг	452.9	1394.5	1087.9	1847.4	1.66	1540.8	2.03	–306.6
	<b>Всего</b>	<b>36412.7</b>	<b>74592.7</b>	<b>39384.9</b>	<b>111005.4</b>	<b>100.00</b>	<b>75797.6</b>	<b>100.00</b>	<b>–35207.8</b>

ция Чавинь со второго места в списке переместилась на пятое.

Прямое сопоставление площади мангровой растительности в 1988 и 2018 гг. позволяет оценить скорость исчезновения мангров в 32% от исходной за 30 лет или около 1% в год. Однако, эта оценка не вполне корректна: цифра потерь в 35 тыс. га является суммарной для двух процессов – исчезновения мангров и их восстановления. Трансформация мангровых зарослей включает их

исчезновение, восстановление и перераспределение в пространстве.

Анализ устойчивости пространственных границ мангровых зарослей приводит к гораздо более высоким значениям скоростей трансформации мангровых лесов в регионе. В пределах своих границ осталась лишь треть площадей мангровых лесов дельты – 36.4 тыс. га. На территории в 74.6 тыс. га произошло замещением мангровой растительности, что отчасти компенсировалось

**Рис. 2.** Мангровые леса в дельте Меконга в 2018 г.

**Таблица 3.** Замещение мангров другими типами земель по данным спутниковой съемки в 1988–2018 гг.

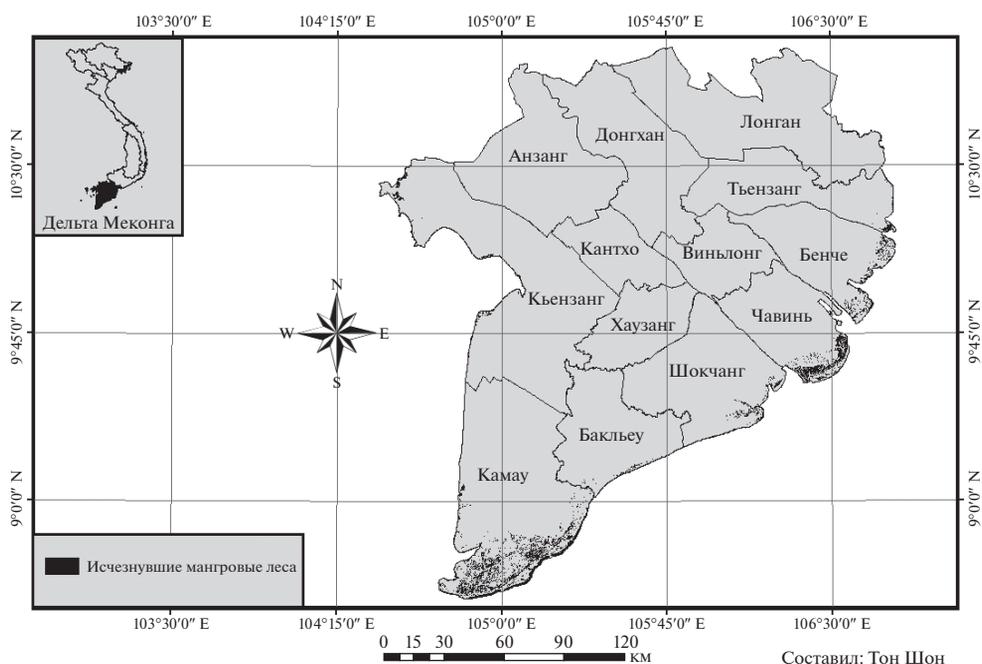
№	Провинция	Замещение мангров другими типами земель, га				Всего
		Сельскохозяйственные	Водные объекты	Аквакультура	Прочие	
1	Кьензянг	297.8	1831.2	3490.7	967.9	6587.6
2	Камау	48.3	12418.3	29014.7	409.9	41891.2
3	Бакльеу	0.0	107.5	700.7	7.6	815.9
4	Сокчанг	701.6	523.3	3237.9	111.1	4573.8
5	Чавинь	118.5	1470.6	11540.1	254.3	13383.4
6	Бенче	252.9	1507.1	4003.0	183.3	5946.3
7	Тьензянг	66.3	403.5	914.5	10.3	1394.5
	<b>Всего</b>	<b>1485.3</b>	<b>18261.5</b>	<b>52901.5</b>	<b>1944.4</b>	<b>74592.7</b>
	%	2.0	24.5	70.9	2.6	100.0

появлением новых мангров на площади в 39 тыс. га.

Причины происходящих изменений можно выявить, отдельно анализируя трансформацию мангров в другие типы угодий (табл. 3) и обратный этому процесс восстановления мангровой растительности (рис. 3, 4, табл. 4). Наибольший вклад в трансформацию мангров вносило развитие аквакультуры: площади искусственных прудов и дамб на месте бывших мангров составили 53.0 тыс. га, т.е. почти половину от побережья, занятого манграми в 1988 г. Второй по значимости фактор — разрушение (абразия) берегов с последующим замещением участков мангровых лесов

морской водной поверхностью (18.0 тыс. га, или 24% от суммарных потерь). Расширение сельскохозяйственных территорий, сооружение новых дорог, расширение населенных пунктов дают небольшой вклад в трансформацию естественных ландшафтов побережья (около 5.5%).

Восстановление мангров на ранее трансформированных участках также широко распространено на обследованном побережье (см. рис. 4). Наибольший прирост площадей молодых мангров обеспечивается за счет забрасываемых хозяйств аквакультуры и перехода от чистой аквакультуры к

**Рис. 3.** Исчезновение мангров в дельте Меконга за период с 1988 по 2018 г.

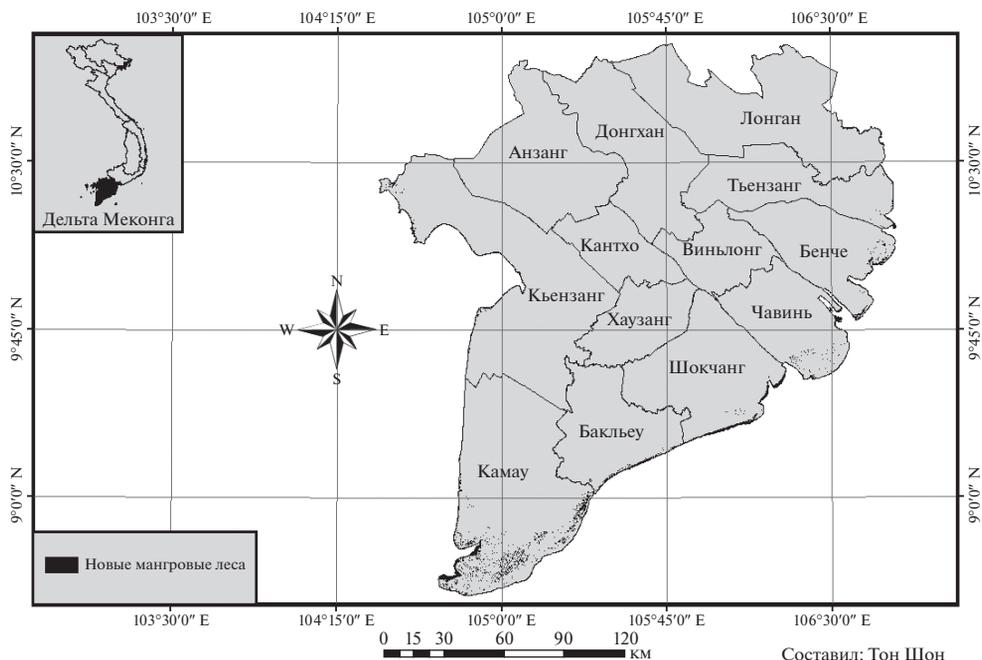


Рис. 4. Появление новых мангров за период с 1988 по 2018 г.

креветочно-мангровым хозяйством. Он составил к 2018 г. более 20.0 тыс. га (см. табл. 4). Распространение мангров на новообразовавшихся к 2018 г. аккумулятивных участках побережья (на месте водной поверхности 1988 г.) произошло на площади 17.0 тыс. га. Развитие молодых мангров на бывших сельскохозяйственных угодьях и других земель было несущественным – чуть более 1.5 тыс. га суммарно.

В балансе площадей мангровых зарослей и других типов угодий ведущую роль играет замещение естественных мангров акваториями искусственно регулируемых гидротехнических соору-

жений – аквакультуры. Только половина их площадей была компенсирована восстановлением мангровых зарослей или креветочно-мангровыми хозяйствами. Баланс отступления и прироста берегов оказался практически нулевым, с небольшим превышением роли абразионных процессов, 18.3 тыс. га мангров были замещены водной поверхностью, а на 17.4 тыс. га происходил обратный процесс. Практически нулевой баланс наблюдался между площадями мангров и сельскохозяйственных угодий.

Пространственные различия в масштабах и направлении трансформации мангровых зарос-

Таблица 4. Восстановление мангров на землях других типов по данным спутниковой съемки в 1988–2018 гг.

№	Провинция	Восстановление мангров на землях других типов, га				Всего
		Сельскохозяйственные	Водные объекты	Аквакультура	Прочие	
1	Кьензанг	598.0	1897.4	471.2	56.4	3023.0
2	Камау	345.5	7600.4	15262.4	1.3	23209.6
3	Бакльеу	190.2	796.9	970.8	0.0	1958.0
4	Сокчанг	98.6	3173.5	945.4	0.8	4218.3
5	Чавинь	237.6	1371.5	1089.2	6.4	2704.7
6	Бенче	74.9	1899.9	1207.2	1.4	3183.4
7	Тьензанг	52.7	670.2	365.0	0.0	1087.9
	<b>Всего</b>	<b>1597.6</b>	<b>17409.7</b>	<b>20311.2</b>	<b>66.4</b>	<b>39384.9</b>
	%	4.1	44.2	51.6	0.2	100.0

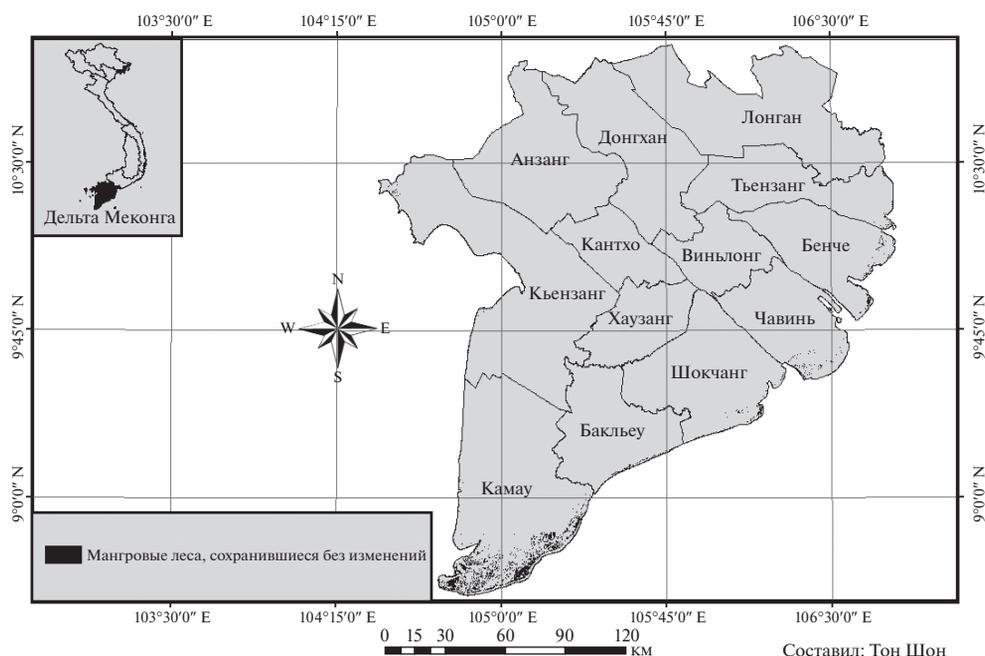


Рис. 5. Участки мангров, сохранившихся без изменений с 1988 по 2018 г.

лей достаточно велики (см. рис. 3 и 4). Дифференцированный анализ пространственной динамики мангров по провинциям (см. табл. 3 и 4) показывает существенные различия не только в их суммарной площади, но и в направлении и характере их трансформации за последние тридцать лет. Изменения, связанные с аквакультурой затронули в наибольшей степени провинцию Камау. Больше трети от исходной площади мангров было замещено аквакультурой. В то же время, более половины мангров Камау расположены на месте бывшей аквакультуры. Практически все потери мангров в провинции Чавинь (11.5 тыс. из 13.4 тыс. га) тоже связаны с замещением мангровой растительности аквакультурой. Обратный процесс затронул гораздо меньшие площади, что привело, в итоге, к высоким относительным потерям мангров.

Наименьшие потери от аквакультуры (около 53% от суммы потерь) отмечены для провинции Кьензянг. В остальных провинциях вклад аквакультуры в потери мангров близок к средним значениям — от 65 до 85%.

Процессы, связанные с перераспределением осадков, исчезновением и появлением мангров у границ прибрежной полосы, затронули наибольшие площади в провинциях Камау и Сокчанг. В Камау преобладали процессы абразии берега: акватория отвоевала более 12 тыс. га мангрового леса, и 7.6 тыс. га появилось вновь. В провинции

Сокчанг, наоборот, преобладали процессы аккумуляции и роста берегов: новообразованные мангры захватили более 3 тыс. га, а потери от абразии составили только около 0.5 тыс. га. Больше половины площади всех мангров этой провинции образовались на акваториях 1988 г.

В целом в дельте Меконга доля сохранившихся мангров, т.е. присутствующих в границах 1988 г., составила 48% от современной площади. Для разных провинций она варьировала в пределах от 26 до 55%. Наибольшие площади ненарушенных мангров сохранились на юге — в провинции Камау, небольшие участки выявлены в провинциях западного побережья (рис. 5).

Скорости трансформации мангров по провинциям демонстрируют большой разброс: для 6 провинций из 7 зафиксировано уменьшение общей площади, для одной (провинция Бакльеу) — увеличение в полтора раза. Для остальных провинций скорость сокращения площади мангров, рассчитанная от площади в 1988 г., составляла от 0.5 до 2.5% в год.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика мангровой растительности в дельте Меконга определяется двумя группами факторов: антропогенными, связанными с изменением характера природопользования в регионе и природными, связанными с процессами абразии и аккумуляции.

муляции донных отложений в прибрежной зоне. Следует заметить, однако, что за ними также может стоять *антропогенная трансформация стока* Меконга [14].

В конце XX в. основной вклад в сокращение мангровых зарослей вносила их вырубка и замещение прудами аквакультуры [20]. Наибольший масштаб и по нашим, и по литературным данным эти процессы имели в провинциях Камау и Чавинь [4, 27]. Падение популярности аквакультуры было связано с падением эффективности марикультур и изменением мер хозяйственного регулирования [30]. В последние десятилетия “чистая” аквакультура в виде открытых прудов постепенно замещается смешанными креветочно-мангровыми хозяйствами [24]. В балансе площадей эти хозяйства дают положительный эффект, а их экологическая эффективность и степень соответствия естественным манграм требуют отдельного обсуждения.

Второе направление антропогенного воздействия на мангры дельты — это искусственные посадки мангров. Традиционно, такие посадки устраиваются для защиты побережий от волновой абразии. Они проводятся в последние десятилетия во всех провинциях и приобретают большой размах.

*Естественный процесс*, стоящий за динамикой мангров в дельте Меконга, это перераспределение донных отложений вдоль побережья. На восточных побережьях преобладают процессы абразии, на западных — аккумуляции донных отложений. Полностью естественным этот процесс назвать нельзя, так как наблюдаемые изменения в динамике донных отложений многие исследователи связывают с увеличением количества дамб в среднем и верхнем течении Меконга [14], а также с развитием системы каналов в южной части дельты [11]. Побережье провинций дельты — это чередование абразионных и аккумулятивных участков (карта и оценка интенсивности процессов приведена в работе [14]), причем скорость как абразии, так и аккумуляции достигает значительных величин — до 22.7 м/год [14]. И на абразионных, и на аккумулятивных участках берегов ведутся интенсивные работы по культивированию мангров.

В результате, современная динамика мангровой растительности является отражением разнонаправленных *природных и антропогенных процессов*, происходящих с разными скоростями. Наши расчеты позволяют дать интегральную оценку результатов этих процессов за тридцатилетний интервал и выявить средние для периода скорости исчезновения и восстановления мангровой растительности. Более точный прогноз требует подробного анализа динамики мангров во времени. Скорость оборота искусственных насаждений состав-

ляет в южных провинциях Вьетнама около 20 лет. В этом возрасте идут в рубку посадки *Rhizophora apiculata* — основного вида мангров в креветочно-мангровых хозяйствах ([3] и данные авторов, полученные из бесед с местными жителями). Таким образом, за исследованный период времени в районах, занятых мангово-креветочной аквакультурой, мог произойти полный цикл трансформации растительности, который остался незамеченным, так как попал между периодами съемки.

Результаты нашего анализа позволяют оценить только среднюю скорость сокращения площади мангров в дельте Меконга, которая составляет около 1% в год. За 30 лет она сократилась примерно на 30%. Эта оценка не учитывает трансформацию мангровых лесов и их перераспределение в пространстве. Условно “нативными”, сохранившимися в своих прежних границах, можно считать лишь около половины существующих сегодня мангровых лесов юга Вьетнама (см. рис. 5).

Средняя скорость исчезновения мангров (1% в год), полученная нами, близка к минимальным оценкам для Вьетнама, и меньше, чем средние значения для Юго-Восточной Азии и в мире — 1–2% [8]. Оценка в 60–70% потерь мангров за три десятилетия [28] становится ближе к реальности, если принимать в расчет не абсолютное сокращение площади мангровой растительности, а скорость ее суммарной трансформации, включая изменение границ в пространстве. В таком понимании это совпадает с нашей оценкой площади мангровых лесов, сохранившихся в постоянных границах — 33% от общей площади мангров в 1988 г.

Существующие расхождения отчасти объясняются различиями в определении области исследования. Непосредственно к дельте Меконга относятся семь прибрежных провинций. Для них суммарная площадь мангровой растительности определена нами в 111.0 тыс. га в 1988 г. и в 75.8 тыс. га для 2018 г. В географические границы южного Вьетнама (Намки) входит еще один участок побережья, расположенный к северу от провинции Тьензянг, в нижнем течении рр. Вамко, Сайгон и Донгнай. Здесь находится большой участок мангрового леса в границах биосферного резервата Канзё. Прежде эта территория относилась к провинции Донгнай, теперь парк административно передан г. Хошимин. Его площадь составляет 75.74 тыс. га, из которых мангры занимают на 2012 г. около 32.0 тыс. га (40% — естественные леса, остальное — лесные посадки) [29]. Динамика мангров этого района за период 1989–2014 гг. описана в [17]. Если включить эту территорию в расчеты, то площадь мангров на юге Вьетнама составляет сейчас немногим более 107.0 тыс. га. Эта величина

близка с оценками ФАО [9], но меньше, чем оценки других авторов [5, 18].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В оценках современной площади мангровой растительности Вьетнама и скоростей ее изменения существует большой разброс. Использование стандартизованных данных и единых методических подходов к выделению мангровой растительности по данным дистанционного анализа позволило точнее оценить ее современную площадь для дельты Меконга и определить среднюю скорость деградации за тридцатилетний период. Суммарные потери составили 35.21 тыс. га, а их скорость – около 1% в год в среднем за 30 лет.

Основными причинами сокращения площади мангровой растительности явились ее замещение прудами аквакультуры и абразия берегов. Восстановление мангров происходит за счет зарастания прудов аквакультуры, перехода к совмещенной мангрово-креветочной аквакультуре и появлению новых мангровых зарослей на аккумулятивных берегах.

Мангры очень динамичны, трансформация их растительности сводится не только к сокращению или увеличению площади зарослей – происходит постоянное их перераспределение в пространстве. Контур мангровой растительности постоянно изменяется. В пределах своих границ за 30 лет осталось менее половины площади современных зарослей мангров.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны д-ру Фунг Тхай Зьонгу (Университет Донг Хап, Каолян, Вьетнам) за неоценную помощь в проведении экспедиционных исследований в 2019 г. Авторы признательны анонимным рецензентам журнала за полезные советы при работе над рукописью.

### ACKNOWLEDGMENTS

The authors greatly appreciate kind assistance of Dr. Phung Thai Duong (Dong Thap University, Vietnam) during field survey in 2019. We are also appreciated to the anonymous reviewers' input that helped us to improve the manuscript.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тон Шон, Добрынин Д.В., Мокиевский В.О. Изменение площади и пространственного распределения мангровых лесов на юге Вьетнама по данным съемок Ландсат за 30 лет // Современные методы и средства океанологических исследований: Материалы XVI Всерос. науч.-технич. конф. М.: Изд. дом Акад. им. Н.Е. Жуковского, 2019. Т. 2. С. 286–288.
2. Alongi D.M. Mangrove forests: resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change // Estuarine, Coastal and Shelf Sci. 2008. V. 76. № 1. P. 1–13.
3. Alongi D.M., Tirendi F., Trott L.A., Xuan T.T. Benthic decomposition rates and pathways in plantations of the mangrove *Rhizophora apiculata* in the Mekong delta, Vietnam // Marine Ecology. Progress Series. 2000. V. 194. P. 87–101.
4. Binh T.N.K.D., Vromant N., Hung N.T., Hens L., Boon E.K. Land cover changes between 1968 and 2003 in Cai Nuoc, Ca Mau peninsula, Vietnam // Environment, Development and Sustainability. 2005. V. 7. № 4. P. 519–536.
5. Blasco F., Aizpuru M., Gers C. Depletion of the mangroves of continental Asia // Wetl. Ecol. Manag. 2001. V. 9. P. 245–256.
6. Dahdouh-Guebas F., Jayatissa L.P., Di Nitto D., Bosire J.O., Seen D.L., Koedam N. How effective were mangroves as a defense against the recent tsunami? // Current biology. 2005. V. 15. № 12. P. R443–R447.
7. Duarte C.M. Introduction // Global Loss of Coastal Habitats: Rates, Causes, and Consequences / Duarte C. (Ed.). Fundación BBVA. Bilbao, 2009. P. 15–24.
8. Duke N.C., Meynecke J.-O., Dittmann S., Ellison A.M., Anger K., Berger U., Cannicci S., Diele K., Ewel K.C., Field C.D., Koedam N., Lee S.Y., Marchand C., Nordhaus I., Dahdouh-Guebas F. A World Without Mangroves? // Science. 2007. V. 317. P. 41–42.
9. FAO. The World's Mangroves 1980–2005 // FAO Forestry Paper. № 153. Rome, Forest Resources Division, FAO, 2007. 77 p.
10. Giri C., Long J., Abbas S., Murali R.M., Qamer F.M., Pengra B., Thau D. Distribution and dynamics of mangrove forests of South Asia // J. Environ. Manage. 2015. V. 148. P. 101–111.
11. Hoang Huu Nguyen, Dargusch P., Moss P., Da Binh Tran. A review of the drivers of 200 years of wetland degradation in the Mekong Delta of Vietnam // Regional Environ. Change. 2016. V. 16. № 8. P. 2303–2315.
12. Hong P.N., San H.T. Mangroves of Vietnam. IUCN, 1993. V. 7. 173 p.
13. Jennerjahn T.C., Ittekkot V. Relevance of mangroves for the production and deposition of organic matter along tropical continental margins // Naturwissenschaften. 2002. V. 89. № 1. P. 23–30.
14. Li X., Liu J. P., Saito Y., Nguyen V.L. Recent evolution of the Mekong Delta and the impacts of dams // Earth-Sci. Rev. 2017. V. 175. P. 1–17.
15. Luther D.A., Greenberg R. Mangroves: a global perspective on the evolution and conservation of their terrestrial vertebrates // BioScience. 2009. V. 59. № 7. P. 602–612. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.1>
16. Mazda Y., Magi M., Kogo M., Hong P.N. Mangroves as a coastal protection from waves in the Tong King delta, Vietnam // Mangroves and Salt marshes. 1997. V. 1. № 2. P. 127–135.
17. Nguyen Thanh Son, Bui Xuan Thanh, Chua Thi Da. Monitoring Mangrove Forest Changes from Multi-

- temporal Landsat Data in Can Gio Biosphere Reserve, Vietnam // *Wetlands*. 2016. V. 36. № 3. P. 565–576.
18. Richards D.R., Friess D.A. Rates and drivers of mangrove deforestation in Southeast Asia, 2000–2012 // *PNAS*. 2016. V. 113. № 2. P. 344–349.
  19. Robertson A.I., Duke N.C. Mangroves as nursery sites: comparisons of the abundance and species composition of fish and crustaceans in mangroves and other near-shore habitats in tropical Australia // *Marine Biol.* 1987. V. 96. № 2. P. 193–205.
  20. Son Hong Truong, Qinghua Ye, Stive M.J.F. Estuarine Mangrove Squeeze in the Mekong Delta, Vietnam // *J. of Coastal Res.* 2017. V. 33. № 4. P. 747–763.
  21. Spalding M., Kainuma M., Collins L. World Atlas of Mangroves. London: Routledge, 2010. 336 p.
  22. Tomlinson P.B. The botany of mangroves. Cambridge Univ. Press, 1994. 419 p.
  23. Trần Thị Hồng Sa, Hà Văn Hành. Transformation of mangrove forest resources in the Mekong Delta and the tasks of their conservation and restoration // *Sci. J. of Hue Univ.* 2008. № 48. P. 135–142. (In Vietnamese).
  24. Truong Thuy Dang, Do Luat Huu. Mangrove forests and aquaculture in the Mekong River delta // *Land Use Policy*. 2018. V. 73. P. 20–28.
  25. Valiela I., Bowen J.L., York J.K. Mangrove Forests: One of the World's Threatened Major Tropical Environments // *Bioscience*. 2001. V. 51. № 10. P. 807–815.
  26. Valiela I., Kinney E., Culbertson J., Peacock E., Smith S. Global losses of mangroves and salt marshes: Magnitudes, causes and consequences // *Global Loss of Coastal Habitats: Rates, Causes, and Consequences* / Duarte C. (Ed.). Fundación BBVA. Bilbao, 2009. P. 107–138.
  27. Van T.T., Wilson N., Thanh-Tung H., Quisthoudt K., Quang-Minh V., Xuan-Tuan L., Dahdouh-Guebas F., Koedam N. Changes in mangrove vegetation area and character in a war and land use change affected region of Vietnam (Mui Ca Mau) over six decades // *Acta Oecologica*. 2015. V. 63. P. 71–81.
  28. Veetil B.K., Ward R.D., Ngo Xuan Quang, Ngo Thi Thu Trang, Tran Hoai Giang. Mangroves of Vietnam: Historical development, current state of research and future threats // *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.* 2019. V. 218. P. 212–236.
  29. Vien Ngoc Nam, Le Van Sinh, Miyagi T., Baba S., Hung Tuck Chan. An Overview of Can Gio District and Mangrove Biosphere Reserve // *ISME Mangrove Ecosystems Technical Reports*. 2014. № 6. P. 1–7.
  30. Vo Q.T., Oppelt N., Leinenkugel P., Kuenzer C. Remote Sensing in Mapping Mangrove Ecosystems – An Object-Based Approach // *Remote Sensing*. 2013. V. 5. P. 183–201.
  31. Vũ Tấn Phương, Nguyễn Thị Mỹ Linh, Nguyễn Văn Trường, Đào Lê Huyền Trang, Nguyễn Hoàng, et al. Integrated Technical Solutions for Sustainable Management and Development of Coastal Protective Forests in Response to Climate Change. Ministry of Agriculture and Rural Development, 2016. 118 p. (In Vietnamese).
  32. Walton M.E., Le Vay L., Truong L.M., Ut V.N. Significance of mangrove–mudflat boundaries as nursery grounds for the mud crab, *Scylla paramamosain* // *Marine Biol.* 2006. V. 149. № 5. P. 1199–1207.

## Dynamics of Mangrove Forests of the Mekong Delta (Vietnam) from 1988 to 2018

Ton Son<sup>1,2</sup>, D. V. Dobrynin<sup>3</sup>, and V. O. Mokievsky<sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup>Dong Thap University, Kaolan, Vietnam

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia

<sup>3</sup>Marine Research Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

\*e-mail: vadim@ocean.ru

The dynamics of the mangrove vegetation area in seven provinces of the Mekong Delta was estimated for the period from 1988 to 2018. For analysis, we used remote sensing data obtained by Landsat satellites (Landsat-4 for 1988–1989 and Landsat-8 for 2017–2018). When processing satellite images, the results of the visible (0.53–0.60 μm), near-infrared (0.53–0.60 μm) and short-wave infrared (0.53–0.60 μm) spectral ranges were used. According to the 1988 survey, the mangroves' area in seven provinces of the Mekong Delta was 111.01 thousand ha; by 2018, the mangroves' area was reduced by a third—to 75.8 thousand ha. The extinction rate of mangroves over a thirty-year period was about 1% per year. Given the territorial redistribution of mangrove vegetation during this time, the undisturbed sections of the mangrove forest that remained in their former borders had an area of 36.4 thousand ha. The main reasons for the reduction of mangrove vegetation were the replacement of mangroves with aquaculture ponds and coastal abrasion.

**Keywords:** mangroves, mangrove forests, Vietnam, Mekong Delta, nature and anthropogenic dynamics of ecosystems, ecosystems' transformation, forest area, remote sensing

### REFERENCES

1. Ton Son, Dobrynin D.V., Mokievskii V.O. Spatial changes in mangrove forests of the South Vietnam over 30 years according to satellite imagery. In *Sovremennyye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy* [Modern Methods and Means of Oceanological Research. Materials of the XVI National Conf. MSOI-2019]. Moscow: Akad. im. N.E. Zhukovskogo, 2019, vol. 2, pp. 286–288. (In Russ.).
2. Alongi D.M. Mangrove forests: resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuar., Coast. Shelf Sci.*, 2008, vol. 76, no. 1, pp. 1–13.

3. Alongi D.M., Tirendi F., Trott L.A., Xuan T.T. Benthic decomposition rates and pathways in plantations of the mangrove *Rhizophora apiculata* in the Mekong delta, Vietnam. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 2000, vol. 194, pp. 87–101.
4. Binh T.N.K.D., Vromant N., Hung N.T., Hens L., Boon E.K. Land cover changes between 1968 and 2003 in Cai Nuoc, Ca Mau peninsula, Vietnam. *Environ. Dev. Sustain.*, 2005, vol. 7, no. 4, pp. 519–536.
5. Blasco F., Aizpuru M., Gers C. Depletion of the mangroves of continental Asia. *Wetl. Ecol. Manag.*, 2001, vol. 9, pp. 245–256.
6. Dahdouh-Guebas F., Jayatissa L.P., Di Nitto D., Bosire J.O., Seen D.L., Koedam N. How effective were mangroves as a defense against the recent tsunami? *Curr. Biol.*, 2005, vol. 15, no. 12, pp. R443–R447.
7. Duarte C.M. Introduction. In *Global Loss of Coastal Habitats: Rates, Causes, and Consequences*. Duarte C., Ed. Bilbao: Fundación BBVA., 2009, pp. 15–24.
8. Duke N.C., Meynecke J.-O., Dittmann S., Ellison A.M., Anger K., Berger U., Cannicci S., Diele K., Ewel K.C., Field C.D., Koedam N., Lee S.Y., Marchand C., Nordhaus I., Dahdouh-Guebas F.A World without mangroves? *Science*, 2007, vol. 317, pp. 41–42.
9. FAO. *The World's Mangroves 1980–2005*. FAO Forestry Paper, no. 153. Rome: Forest Resources Division, FAO, 2007. 77 p.
10. Giri C., Long J., Abbas S., Murali R.M., Qamer F.M., Pengra B., Thau D. Distribution and dynamics of mangrove forests of South Asia. *J. Environ. Manage.*, 2015, vol. 148, pp. 101–111.
11. Hoang Huu Nguyen, Dargusch P., Moss P., Da Binh Tran. A review of the drivers of 200 years of wetland degradation in the Mekong Delta of Vietnam. *Reg. Environ. Change*, 2016, vol. 16, no. 8, pp. 2303–2315.
12. Hong P.N., San H.T. *Mangroves of Vietnam*. IUCN, 1993, vol. 7. 173 p.
13. Jennerjahn T.C., Ittekkot V. Relevance of mangroves for the production and deposition of organic matter along tropical continental margins. *Naturwissenschaften*, 2002, vol. 89, no. 1, pp. 23–30.
14. Li X., Liu J. P., Saito Y., Nguyen V.L. Recent evolution of the Mekong Delta and the impacts of dams. *Earth-Sci. Rev.*, 2017, vol. 175, pp. 1–17.
15. Luther D.A., Greenberg R. Mangroves: a global perspective on the evolution and conservation of their terrestrial vertebrates. *BioScience*, 2009, vol. 59, no. 7, pp. 602–612. doi 10.1525/bio.2009.59.7.1
16. Mazda Y., Magi M., Kogo M., Hong P.N. Mangroves as a coastal protection from waves in the Tong King delta, Vietnam. *Mangroves and Salt Marshes*, 1997, vol. 1, no. 2, pp. 127–135.
17. Nguyen Thanh Son, Bui Xuan Thanh, Chau Thi Da. Monitoring mangrove forest changes from multi-temporal Landsat data in Can Gio biosphere reserve, Vietnam. *Wetlands*, 2016, vol. 36, no. 3, pp. 565–576.
18. Richards D.R., Friess D.A. Rates and drivers of mangrove deforestation in Southeast Asia, 2000–2012. *PNAS*, 2016, vol. 113, no. 2, pp. 344–349.
19. Robertson A.I., Duke N.C. Mangroves as nursery sites: comparisons of the abundance and species composition of fish and crustaceans in mangroves and other near-shore habitats in tropical Australia. *Mar. Biol.*, 1987, vol. 96, no. 2, pp. 193–205.
20. Son Hong Truong, Qinghua Ye, Stive M.J.F. Estuarine mangrove squeeze in the Mekong Delta, Vietnam. *J. Coast. Res.*, 2017, vol. 33, no. 4, pp. 747–763.
21. Spalding M., Kainuma M., Collins L. *World Atlas of Mangroves*. London: Routledge, 2010. 336 p.
22. Tomlinson P. B. *The Botany of Mangroves*. Cambridge Univ. Press, 1994. 419 p.
23. Trần Thị Hồng Sa, Hà Văn Hành. Transformation of mangrove forest resources in the Mekong Delta and the tasks of their conservation and restoration. *Sci. J. Hue Univ.*, 2008, no. 48, pp. 135–142. (In Vietnamese).
24. Truong Thuy Dang, Do Luat Huu. Mangrove forests and aquaculture in the Mekong River delta. *Land Use Policy*, 2018, vol. 73, pp. 20–28.
25. Valiela I., Bowen J. L., York J.K. Mangrove forests: One of the world's threatened major tropical environments. *Bioscience*, 2001, vol. 51, no. 10, pp. 807–815.
26. Valiela I., Kinney E., Culbertson J., Peacock E., Smith S. Global losses of mangroves and salt marshes: Magnitudes, causes and consequences. In *Global Loss of Coastal Habitats: Rates, Causes, and Consequences*. Duarte C., Ed. Bilbao: Fundación BBVA, 2009, pp. 107–138.
27. Van T.T., Wilson N., Thanh-Tung H., Quisthoudt K., Quang-Minh V., Xuan-Tuan L., Dahdouh-Guebas F., Koedam N. Changes in mangrove vegetation area and character in a war and land use change affected region of Vietnam (Mui Ca Mau) over six decades. *Acta Oecologica*, 2015, vol. 63, pp. 71–81.
28. Veettil B.K., Ward R.D., Ngo Xuan Quang, Ngo Thi Thu Trang, Tran Hoai Giang. Mangroves of Vietnam: Historical development, current state of research and future threats. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 2019, vol. 218, pp. 212–236.
29. Vien Ngoc Nam, Le Van Sinh, Miyagi T., Baba S., Hung Tuck Chan. An overview of Can Gio District and mangrove biosphere reserve. In *Studies in Can Gio Mangrove Biosphere Reserve*. Vietnam Mangrove Ecosystems Technical Reports, vol. 6. Ho Chi Minh City, 2014, pp. 1–7.
30. Vo Quoc Tuan, Oppelt N., Leinenkugel P., Kuenzer C. Remote sensing in mapping mangrove ecosystems — an object-based approach. *Remote Sensing*, 2013, vol. 5, pp. 183–201.
31. Vũ Tấn Phương, Nguyễn Thị Mỹ Linh, Nguyễn Văn Trường, Đào Lê Huyền Trang, Nguyễn Hoàng, et al. *Integrated Technical Solutions for Sustainable Management and Development of Coastal Protective Forests in Response to Climate Change*. Ministry of Agriculture and Rural Development, 2016. 118 p. (In Vietnamese).
32. Walton M.E., Le Vay L., Truong L. M., Ut V.N. Significance of mangrove–mudflat boundaries as nursery grounds for the mud crab, *Scylla paramamosain*. *Mar. Biol.*, 2006, vol. 149, no. 5, pp. 1199–1207.