



# Прогноз изменений типов прибрежных водно-болотных угодий под воздействием повышения уровня моря с использованием модели SLAMM

Куен Динь Туен<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия  
✉ quyendinh TUYEN97@mail.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Куен Динь Туен. Прогноз изменений типов прибрежных водно-болотных угодий под воздействием повышения уровня моря с использованием модели SLAMM // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 3. С. 44–60. DOI:10.30533/GiA-2025-020.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** прибрежные водно-болотные угодья, SLAMM, повышение уровня моря, изменение климата, дельта Красной реки, прогноз, Вьетнам

**АННОТАЦИЯ** Экосистемы водно-болотных угодий имеют решающее значение для сохранения экологической устойчивости, выполняя задачи по очистке воды, накоплению углерода и предотвращению наводнений. Однако изменение климата и повышение уровня моря угрожают этим экосистемам, особенно в прибрежных районах. В настоящем исследовании с помощью модели SLAMM (*англ.* Sea Level Affecting Marshes Model) оценивается воздействие повышения уровня моря на экосистемы водно-болотных угодий в межпровинциальном биосферном резервате «Дельта Красной реки» во Вьетнаме. Для моделирования изменений в экосистемах были использованы карты водно-болотных угодий, классифицированные на основе спутниковых снимков PlanetScope (2016–2022 годы) с разрешением 4,77 м по девяти типам земель. Эти карты, обработанные с применением глубокого обучения, были преобразованы в формат SLAMM. Сценарий, использованный в данном исследовании, основан на сценарии RCP8.5, который разработан Министерством природных ресурсов и окружающей среды Вьетнама и предсказывает повышение уровня моря на 1 м к 2100 году. Результаты исследования показывают, что при данном сценарии повышение уровня моря приведет к значительным изменениям в распределении экосистем водно-болотных угодий, особенно мангровых лесов и приливно-отливных отмелей. Эти данные имеют важное значение для разработки адаптационных мер и стратегий устойчивого управления прибрежными экосистемами.

# 1 Введение

Водно-болотные угодья имеют большое значение для человека и природы, так как они способны фильтровать вредные вещества; накапливать углерод, что способствует сглаживанию последствий изменения климата; смягчать негативные эффекты экстремальных погодных условий; аккумулировать дождевую воду и ливневый сток во время штормов, снижая риск наводнений, и поддерживать водные запасы в засушливые периоды. Они обеспечивают биологическое разнообразие и служат средой обитания более чем для 100 тысяч видов организмов, а также являются источником продовольствия и создают возможности устойчивого развития для местного населения. Эти территории играют ключевую роль в регулировании климата, поддержании биологического разнообразия и защите береговой линии<sup>1</sup>. Тем не менее в условиях изменения климата и роста уровня моря возрастает давление на экосистемы водно-болотных угодий, особенно в прибрежных районах [1]. Согласно данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата (*англ.* Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), средний уровень Мирового океана с начала XX века повысился примерно на 20 см и, согласно прогнозам, может увеличиться на 0,6–1 м к концу XXI века<sup>2</sup>. Во Вьетнаме дельта реки Меконг уже претерпела значительные изменения в связи с повышением уровня моря, что вызывает засоление и потерю сельскохозяйственных угодий, снижает продуктивность сельского хозяйства и угрожает экосистемам мангровых лесов [2]. Несмотря на то что повышение уровня моря представляет серьезную угрозу для всех прибрежных водно-болотных угодий, предыдущие исследования в основном сосредоточивались на оценке их уязвимости для соленого прилива. Поэтому необходимо разработать конкретные сценарии воздействия изменения климата, в которых основное внимание уделяется повышению уровня моря и изменениям в прибрежных водно-болотных угодьях, с целью комплексной оценки рисков и предложения эффективных адаптационных мер.

Вьетнам является прибрежным государством с протяженной береговой линией, охватывающей территорию от севера до юга, что способствует формированию богатых экосистем водно-болотных угодий<sup>3</sup>. Однако прибрежные экосистемы водно-болотных угодий испытывают постоянное давление со стороны изменения климата и антропогенной деятельности. Эти экосистемы подвергаются угрозе постоянного затопления в результате быстрого повышения уровня моря. У них также сокращаются возможности для адаптации, так как прибрежные территории все более интенсивно осваиваются человеком [3]. В этой связи управляющим прибрежными природоохранными территориями водно-болотных угодий необходимы соответствующие инструменты для оценки потенциального воздействия повышения уровня моря на разнообразные экосистемы водно-болотных угодий.

Прогнозирование изменений климата и их воздействия на водно-болотные угодья, а также оценка антропогенного влияния имеют важное значение для разработки более эффективных стратегий сохранения и восстановления местообитаний. Реакция водно-болотных угодий на повышение уровня моря может быть смоделирована с использованием прибрежных моделей воздействия. Так, модель влияния уровня моря на болота (*англ.* Sea Level Affecting

1 Чан Х.Т. Оценка эффективности модели устойчивого использования природных ресурсов моллюсков на пойменных территориях устья Красной реки в пределах национального парка Суантхуи (Намдинь) (перевод с вьетнамского языка) / Национальный экономический университет, 2014. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dlib.neu.edu.vn/items/d39e5666-ab3f-48df-8bf0-5c34830da787> (дата обращения: 10.11.2024).

2 Сценарии изменения климата и повышения уровня моря для Вьетнама (перевод с вьетнамского языка) / Министерство природных ресурсов и окружающей среды Вьетнама, 2012. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://imh.ac.vn/files/doc/KichbanBDKH/Kich%20ban%20Bien%20doi%20khi%20hau\\_2009.pdf](https://imh.ac.vn/files/doc/KichbanBDKH/Kich%20ban%20Bien%20doi%20khi%20hau_2009.pdf) (дата обращения: 10.11.2024).

3 Ле В.К. Водно-болотные угодья. Ханой: Образование, 2005. 215 с. (На вьетнамском языке).

Marshes Model, SLAMM) позволяет определить местообитания с подходящими гидрогеологическими условиями, менее подверженные воздействию повышения уровня моря, на основе ряда ключевых гидрологических и биологических процессов [4]. SLAMM<sup>4</sup> создает прогнозные карты изменений водно-болотных угодий под воздействием быстрого повышения уровня моря и предоставляет детальную информацию о перемещении местообитаний, обусловленном повышением уровня моря<sup>5</sup>.

Модель SLAMM широко используется в различных исследованиях для прогнозирования воздействия повышения уровня моря на водно-болотные угодья, что способствует разработке стратегий управления ими и их сохранения. Так, К.Е. Акуму (C.E. Akumu) применил SLAMM для прогнозирования изменений мангровых лесов под воздействием повышения уровня моря, что позволило оценить их будущую пространственную распределенность [5]. А. Пайо (A. Paou) и его соавторы использовали SLAMM, чтобы подвергнуть анализу влияние повышения уровня моря на солончаковые болота в северо-западной части Тихоокеанского региона. Это помогло выявить перемещения и изменения ключевых местообитаний [6]. М. Коул Экберг (M. Cole Ekberg) применила SLAMM для оценки потерь и изменений водно-болотных угодий на юго-востоке США, и результаты данного исследования оказались значимыми для разработки мер по охране окружающей среды [7]. В работе М. Фернандеса-Нуньеса (M. Fernandez-Nunez) SLAMM использовалась для оценки потенциала и прогнозирования изменений солончаковых болот Атлантико-Средиземноморского региона Пуэрто-Рико под воздействием будущего повышения уровня моря и для приложений в управлении [8]. Кроме того, аналогичные исследования с применением SLAMM [9–11] способствовали созданию сценариев изменения водно-болотных угодий в будущем под влиянием климатических изменений.

В данном исследовании ставится цель оценить потенциальное воздействие повышения уровня моря на прибрежные экосистемы водно-болотных угодий в районе дельты Красной реки во Вьетнаме с использованием модели SLAMM. Основные задачи исследования включают:

- моделирование перемещений различных типов водно-болотных угодий при различных сценариях повышения уровня моря до 2100 года;
- определение изменений площади водно-болотных угодий под воздействием повышения уровня моря;
- обсуждение полученных результатов и внесение вклада в совершенствование стратегии управления прибрежными экосистемами водно-болотных угодий и их охраны.

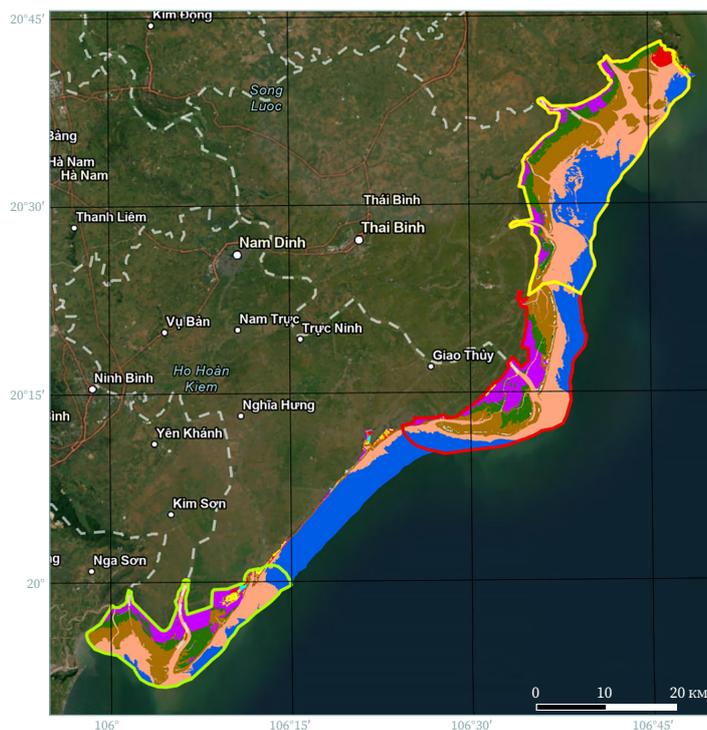
## 2 Материалы и методы

### 2.1 Область исследования

Межпровинциальный биосферный резерват прибрежных водно-болотных угодий «Дельта Красной реки» был признан ЮНЕСКО всемирным биосферным резерватом 2 декабря 2004 года и охватывает территории пяти уездов в трех провинциях — Намдинь, Ниньбинь и Тхайбинь (рис. 1). Эта территория имеет важное значение для сохранения биологического разнообразия Юго-Восточной Азии, особенно редких видов птиц. Крупные прибрежные мангровые леса

4 SLAMM: Sea Level Affecting Marshes Model / Warren Pinnacle Consulting, Inc. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://warrenpinnacle.com/prof/SLAMM/index.html> (дата обращения: 26.08.2024).

5 Brophy L.S., Ewald M.J. Modeling Sea level rise impacts to Oregon's tidal wetlands: Maps and prioritization tools to help plan for habitat conservation into the future. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ir.library.oregonstate.edu/concern/technical\\_reports/tt44ps38k](https://ir.library.oregonstate.edu/concern/technical_reports/tt44ps38k) (дата обращения: 12.10.2024).



**Рис. 1**  Межпровинциальный биосферный резерват прибрежных водно-болотных угодий «Дельта Красной реки» (Вьетнам)

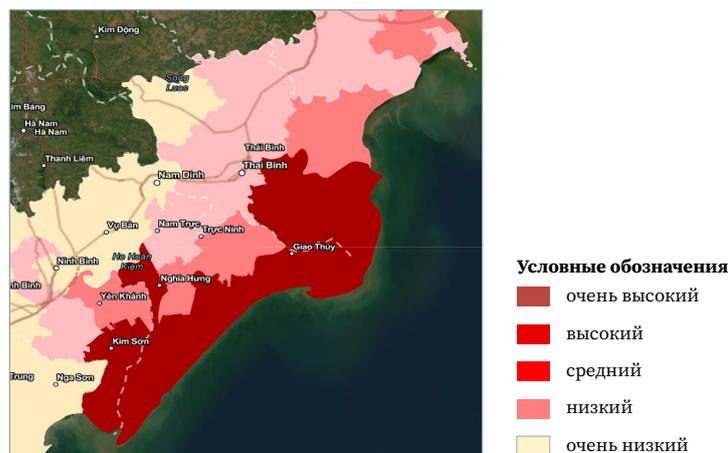
**Fig. 1** Red River Delta Interprovincial Coastal Wetland Biosphere Reserve (Vietnam)

помогают защитить береговую линию и противостоять стихийным бедствиям, поддерживая стабильность жизни для местного населения [12].

Согласно сценарию изменения климата во Вьетнаме, опубликованному Министерством природных ресурсов и окружающей среды (англ. Ministry of Natural Resources and Environment, MONRE) в 2020 году, под воздействием изменения климата экосистемы водно-болотных угодий подвергнутся влиянию и изменятся в будущем (рис. 2<sup>6</sup>). В случае реализации сценариев, предложенных в исследовании, к 2100 году эта территория водно-болотных угодий может испытать серьезное воздействие вследствие возможного повышения уровня моря<sup>7</sup> до 100 см. Поэтому необходимо разрабатывать адаптационные сценарии, включая сценарии воздействия повышения уровня моря на межпровинциальный резерват водно-болотных угодий в дельте Красной реки. Подобные сценарии также послужат основой для прогнозирования и планирования в других прибрежных регионах.

**Рис. 2**  Уровень воздействия повышения уровня моря на 1 м к 2100 году по сценарию Министерства природных ресурсов и окружающей среды Вьетнама

**Fig. 2** Impact level of a 1 m sea level rise by 2100 according to Vietnam's Ministry of Natural Resources and Environment scenario



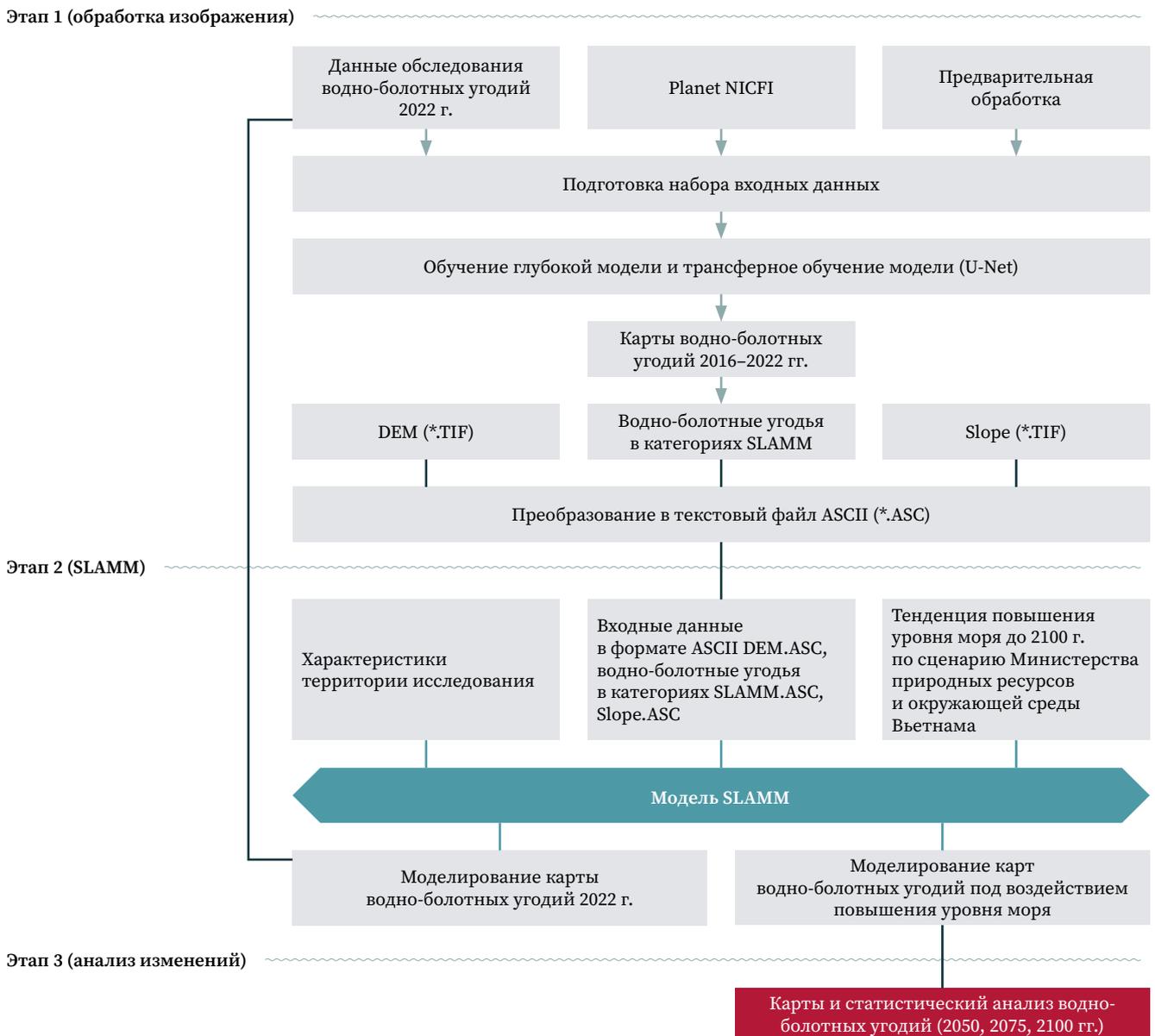
6 Центр адаптации к изменению климата (перевод с вьетнамского языка). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://adaptation.dcc.gov.vn> (дата обращения: 26.08.2024).

7 Нгуен В.Т., Фам Т.Т.Н., Хуинь Т.Л.Х. Сценарии изменения климата (перевод с вьетнамского языка) / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды, 2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.dcc.gov.vn/kien-thuc/1090/Kich-ban-bien-doi-khi-hau-cap-nhat-nam-2020.html> (дата обращения: 12.10.2024).

## 2.2 Методология исследования

Методологию данного исследования (рис. 3) составляют:

- подготовка данных спутниковых изображений и выполнение этапов предварительной обработки, включая анализ изображений для создания карт различных типов водно-болотных угодий, обработка цифровой модели высот (*англ.* Digital Elevation Model, DEM) и слоя уклона (*англ.* Slope);
- подготовка входных данных и настройка параметров для модели SLAMM с целью прогнозирования и представления сценариев повышения уровня моря, влияющих на водно-болотные угодья, в соответствии со сценарием RCP8.5 на 2050, 2075 и 2100 годы;
- проведение анализа и оценки изменения площади и распределения различных типов водно-болотных угодий, прогнозируемых до 2100 года.



**Рис. 3** Методология исследования

**Fig. 3** Research methodology

## 2.3 Подготовка входных данных

Модель SLAMM основана на принципе разделения пространства на однородные растровые ячейки для моделирования изменений окружающей среды, особенно в районах водно-болотных угодий. В этой модели такие входные данные, как высота и тип покрытия поверхности, играют важную роль в прогнозировании изменений водно-болотных угодий со временем под воздействием повышения уровня моря и других антропогенных факторов. Каждый слой данных тщательно собирается и обрабатывается для обеспечения высокой точности, что позволяет модели проводить детальный анализ взаимодействий экосистем водно-болотных угодий и непроницаемых покрытий. Эти этапы обработки данных способствуют оптимизации точности прогнозов и обеспечивают глубокое понимание возможных сценариев изменения климата [13].

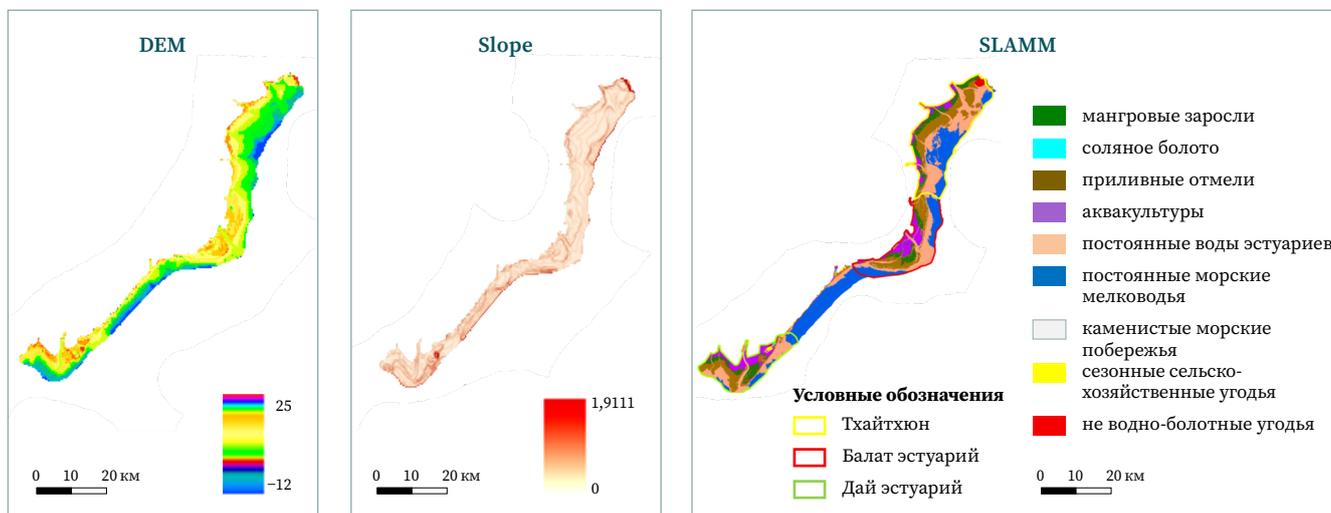
### 2.3.1 Данные высот

Высотные данные являются одним из трех основных источников данных для модели прогноза SLAMM, предоставляя важную информацию, позволяющую определить зоны, подверженные риску затопления или изменений, и, таким образом, классифицировать водно-болотные угодья по степени их чувствительности [13]. Высотные данные обычно собираются с помощью спутниковых снимков, технологии LiDAR или полевых измерений, что обеспечивает высокую детализацию и точность. В данной работе используются открытые высотные данные GEBCO, что позволило детально определить высоты прибрежных районов и континентального шельфа в зоне исследования. Благодаря высокой надежности и широкому охвату данные GEBCO являются важной основой для оценки воздействия повышения уровня моря на чувствительные районы.

После загрузки данные были интерполированы с пространственным разрешением 10 м и сглажены, а затем обрезаны по границам прогнозируемой территории (рис. 4, DEM). Данные были преобразованы из формата TIFF в текстовый формат ASC для интеграции в модель SLAMM. Для оптимизации времени обработки территория водно-болотных угодий была разделена на три ключевые зоны, что позволило уменьшить объем обработки и предоставить более детальное представление о каждой чувствительной зоне в рамках исследования. Высотные данные были привязаны к вертикальной системе отсчета уровня моря Хондау во Вьетнаме, которая базируется на среднем уровне моря, измеренном на приливной станции Хондау. Этот уровень используется для прибрежных провинций в дельте Красной реки, что обеспечивает согласованность в оценке прибрежных водно-болотных угодий и поддерживает анализ воздействия изменения климата и повышения уровня моря в этом регионе.

**Рис. 4**  Входные данные для модели SLAMM

**Fig. 4**  
Input data for the SLAMM model



### 2.3.2 Данные об уклоне

В модели SLAMM уклон является важным фактором для определения процессов перехода между классами водно-болотных угодий. Уклон рассчитывается на основе DEM и используется для определения процентного соотношения растровых ячеек, которые могут подвергнуться потере или переходу в другой класс. Точный уклон поверхности водно-болотных угодий позволяет модели прогнозировать проникновение соленой воды в различные зоны, что влияет на распределение и чувствительность типов водно-болотных угодий. Инструменты ГИС, такие как QGIS и ArcGIS, позволяют легко рассчитывать уклон на основе предварительно обработанных DEM (рис. 4, Slope). Использование уклона в модели является ключевым элементом для оценки воздействия повышения уровня моря на водно-болотные угодья.

### 2.3.3 Данные о прибрежных водно-болотных угодьях по категориям SLAMM

В этом исследовании растры, отображающие виды водно-болотных угодий, были созданы с использованием метода обработки спутниковых снимков PlanetScore с применением глубокого обучения и метода трансфера обучения для временных рядов с 2016 по 2022 год с разной точностью [14]. Точность модели глубокого обучения составила 91,3 %, что позволяет автоматически классифицировать прибрежные земли с использованием спутниковых данных PlanetScore с разрешением 4,77 м. Карты водно-болотных угодий, полученные в предыдущих исследованиях автора, были использованы в модели SLAMM в данном исследовании (рис. 4, SLAMM). Кодировки водно-болотных угодий с полученных карт были переведены автором в кодировки SLAMM, как указано в технической документации SLAMM 6.7<sup>8</sup>. Согласно этим данным, искусственные водно-болотные угодья для аквакультуры были преобразованы во внутренние пресноводные болота, а районы соляных полей — в солончаковые болота. Сельскохозяйственные угодья были классифицированы как неосвоенная суша, не водно-болотные угодья — как освоенная суша (табл. 1).

**Таблица 1** ➔

Типы водно-болотных угодий в дельте Красной реки по категориям SLAMM

**Table 1**

Wetland types of the Red River Delta by SLAMM category

Водно-болотные угодья	Код в ГИС по категориям SLAMM
Мангровые заросли	9
Соляные поля	7
Приливные отмели	11
Постоянные воды эстуариев	17
Аквакультуры	5
Постоянные морские мелководья	19
Песчано-галечные или галечные пляжи	14
Сезонные сельскохозяйственные угодья	2
Не водно-болотные угодья	1

Карты водно-болотных угодий в формате растров для различных лет с разрешением 4,77 м были классифицированы по девяти типам земель. Поэтому данные DEM и уклон также были выбраны с аналогичным разрешением для их использования в качестве входных данных в программе SLAMM с одинаковыми размерами ячеек. Процесс выборки, увеличения разрешения и обрезки изображений по одинаковым размерам, а также преобразование карты водно-болотных угодий в формат SLAMM были выполнены с помощью программы ArcMap 10.8.

<sup>8</sup> SLAMM 6.7 Technical Documentation / Warren Pinnacle Consulting, 2016. P. 40. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://warrenpinnacle.com/prof/SLAMM6/SLAMM\\_6.7\\_Technical\\_Documentation.pdf](https://warrenpinnacle.com/prof/SLAMM6/SLAMM_6.7_Technical_Documentation.pdf) (дата обращения: 12.10.2024).

Затем все данные были преобразованы в формат ASCII file (\*.asc) для моделирования в программе SLAMM 6.7. Несмотря на то что карты водно-болотных угодий на 2022 год для исследуемой области уже были доступны, для анализа SLAMM была выбрана информация за 2016 год, поскольку данные наблюдений за период 2016–2022 годов использовались для оценки точности модели.

## 2.4 Модель SLAMM

SLAMM — это специализированный инструмент для моделирования воздействия повышения уровня моря (*англ.* Sea Level Rise, SLR) на экосистемы прибрежных водно-болотных угодий. Для выполнения моделирования SLAMM требует входных данных, включая карты водно-болотных угодий, цифровую модель высот и параметры уклона местности для определения степени воздействия колебаний уровня воды<sup>9</sup>. Другим важным фактором являются сценарии повышения уровня моря, которые были взяты из климатических моделей, таких как RCP8.5, согласно сценариям Министерства ресурсов и окружающей среды Вьетнама для провинций дельты Красной реки до 2100 года со сценарием максимально возможного повышения уровня моря<sup>10</sup>. Кроме того, SLAMM использует параметры оседания земли, скорости отложения осадков и эрозии, чтобы обеспечить точное отражение реальных условий, особенно в районах с чувствительным рельефом или на границе с открытыми водами.

Процесс настройки модели SLAMM проводится в соответствии с инструкциями по входным данным и установке параметров для модели. Опираясь на результаты предыдущих исследований, в данной статье автор рассматривает сценарии RCP8.5, разработанные Министерством ресурсов и окружающей среды Вьетнама в 2020 году, с использованием аналогичных прогнозов, представленных в специальных отчетах IPCC по океанам. Сценарии температуры RCP8.5 предсказывают увеличение на 2 °C к 2100 году, и уровень моря поднимется на 1 м к концу XXI века (рис. 5)<sup>11</sup>. В данном исследовании определяются конкретные временные моменты, такие как 2022, 2050, 2075 и 2100 годы, в соответствии с климатическими и экологическими сценариями Министерства ресурсов и окружающей среды Вьетнама, с учетом повышения уровня моря на 0,17 м, 0,35 м, 0,65 м и 1 м соответственно<sup>10</sup>.

В модели SLAMM, применяемой для дельты Красной реки, темпы аккумуляции мангровых лесов определяются на основе местных исследований и демонстрируют значительные изменения в зависимости от региона. Средний темп аккумуляции мангров в этом районе составляет около 10 мм/год [15]. Для настройки модели SLAMM, помимо данных о высотах и картографических данных, необходимо учитывать дополнительные параметры:

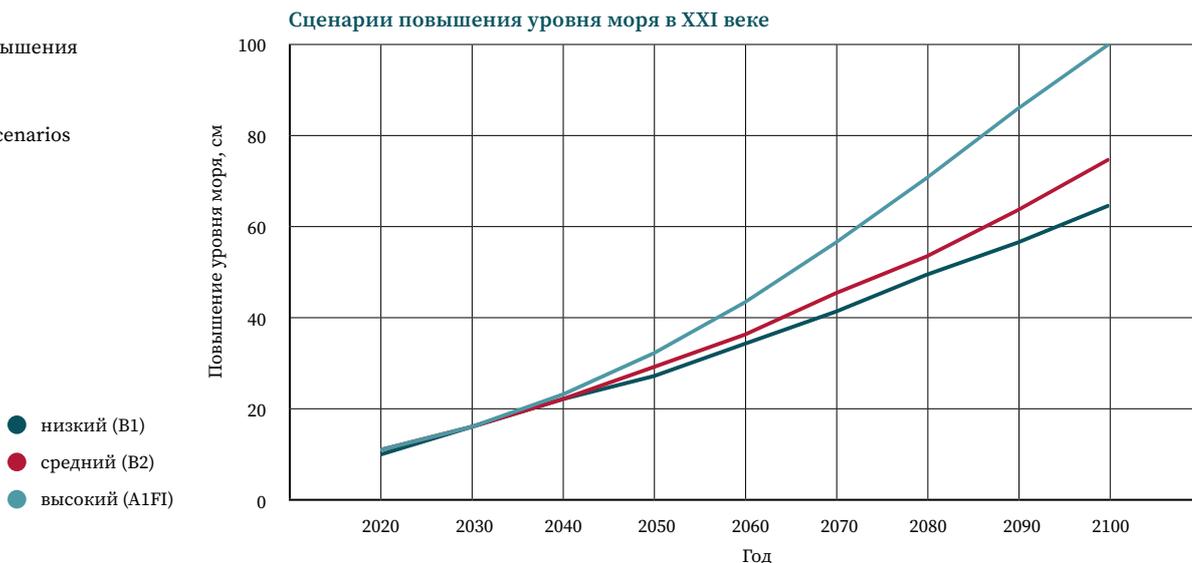
- 1) офшорное направление DEM, определенное как [восток], чтобы предоставить важную информацию об экологических факторах;
- 2) амплитуду прилива от 1 до 1,5 м [16], которая описывает изменение уровня воды с течением времени;
- 3) скорость эрозии болот около 19,7 м/год [17], которая дает данные о скорости эрозии болот, влияющей на процессы накопления;
- 4) темпы роста мангровых лесов на уровне 5 мм/год, показывающие адаптивные способности мангров к изменениям климата;

9 SLAMM 6.7 Technical Documentation / Warren Pinnacle Consulting, 2016. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://warrenpinnacle.com/prof/SLAMM6/SLAMM\\_6.7\\_Technical\\_Documentation.pdf](https://warrenpinnacle.com/prof/SLAMM6/SLAMM_6.7_Technical_Documentation.pdf) (дата обращения: 12.10.2024).

10 Нгуен В.Т., Фам Т.Т.Н., Хуинь Т.Л.Х. Сценарии изменения климата (перевод с вьетнамского языка) / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Вьетнама, 2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.dcc.gov.vn/kien-thuc/1090/Kich-ban-bien-doi-khi-hau-cap-nhat-nam-2020.html> (дата обращения: 12.10.2024).

11 Climate change 2001: The scientific basis / J.T. Houghton (ed.). Cambridge University Press, 2001. 892 p.

**Рис. 5**   
 Сценарии повышения  
 уровня моря  
**Fig. 5**  
 Sea level rise scenarios



- 5) предварительная обработка высот установлена на [False], что указывает на отсутствие необходимости в предварительной обработке высот в процессе моделирования.

## 2.5 Принцип работы SLAMM

Реакция людей на потерю суши из-за повышения уровня моря является сложной проблемой с множеством влияющих факторов. Участки суши, которые были освоены (*англ. Developed Dry Land*) и которые не были освоены (*англ. Undeveloped Dry Land*), могут стать переходными солончаковыми болотами (*англ. Trans. Salt Marsh*), когда уровень опускается ниже определенной высоты в зависимости от условий затопления. В то время как в местах с высокой стоимостью земли владельцы могут продолжать строить дамбы и стены от наводнений, чтобы предотвратить дальнейшее затопление, в других регионах будут защищать только освоенную сушу или владельцы могут покинуть свою собственность, в результате произойдет переход к водно-болотным угодьям. Модель SLAMM способна смоделировать сценарии защиты, такие как «Не защищать» (*англ. Protect None*), «Защищать освоенную сушу» (*англ. Protect Developed Dry Land*) и «Защищать всю сушу» (*англ. Protect All Dry Land*), что позволяет анализировать влияние затопления на различные экосистемы<sup>12</sup>.

Внутренние пресноводные болота (*англ. Inland-Fresh Marsh*) могут затопляться и превращаться в приливные пресноводные болота, в то время как переходные солончаковые болота могут стать регулярно затопляемыми болотами (*англ. Regularly-Flooded Marsh*), когда уровень опускается ниже минимальной высоты. Водно-болотные угодья (*англ. Mangrove*) могут развиваться, если участок признан тропическим. Приливно-отливные отмели (*англ. Tidal Flat*) и скалистая приливно-отливная зона (*англ. Rocky Intertidal*) обычно превращаются в открытые воды эстуария (*англ. Estuarine Open Water*), когда уровень опускается ниже определенной высоты, в то время как открытый океан (*англ. Open Ocean*) не подлежит никаким изменениям<sup>12</sup>.

Для оценки точности модели SLAMM и ее применимости в последующие годы была использована карта водно-болотных угодий 2016 года в качестве основы для определения сценария изменений на 2022 год. Этот сценарий будет сопоставлен с картой водно-болотных угодий 2022 года с помощью метода

<sup>12</sup> SLAMM 6.7 Technical Documentation / Warren Pinnacle Consulting, 2016. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://warrenpinnacle.com/prof/SLAMM6/SLAMM\\_6.7\\_Technical\\_Documentation.pdf](https://warrenpinnacle.com/prof/SLAMM6/SLAMM_6.7_Technical_Documentation.pdf) (дата обращения: 12.10.2024).

наложения, что позволит получить целостное представление об изменениях в водно-болотных угодьях за этот период [14] (с учетом того, что в течение шести лет изменения климата не оказали значительного влияния на водно-болотные угодья, и при игнорировании условий оседания).

Процесс предварительной обработки спутниковых снимков для получения карты водно-болотных угодий был выполнен с использованием программного обеспечения ArcGIS Pro, ArcMap 10.8 и Jupyter Notebook. В ходе этого процесса был рассчитан растр для цифровой модели высот, уклона и проведены такие этапы, как сглаживание, обрезка и преобразование системы координат, чтобы гарантировать, что все данные приведены к одной географической системе координат. В частности, процесс преобразования формата TIF в формат ASCII был осуществлен с помощью ArcMap 10.8 в сочетании с RStudio для обработки растра с одинаковым количеством и размером ячеек. После завершения этапа предварительной обработки сценарии были проанализированы и реализованы в версии SLAMM 6.7. Наконец, эти сценарии были статистически обработаны, оценены и представлены через программное обеспечение ArcGIS Pro и Microsoft Excel, что дало общее представление об изменениях в экосистеме водно-болотных угодий.

### 3 Результаты и обсуждение

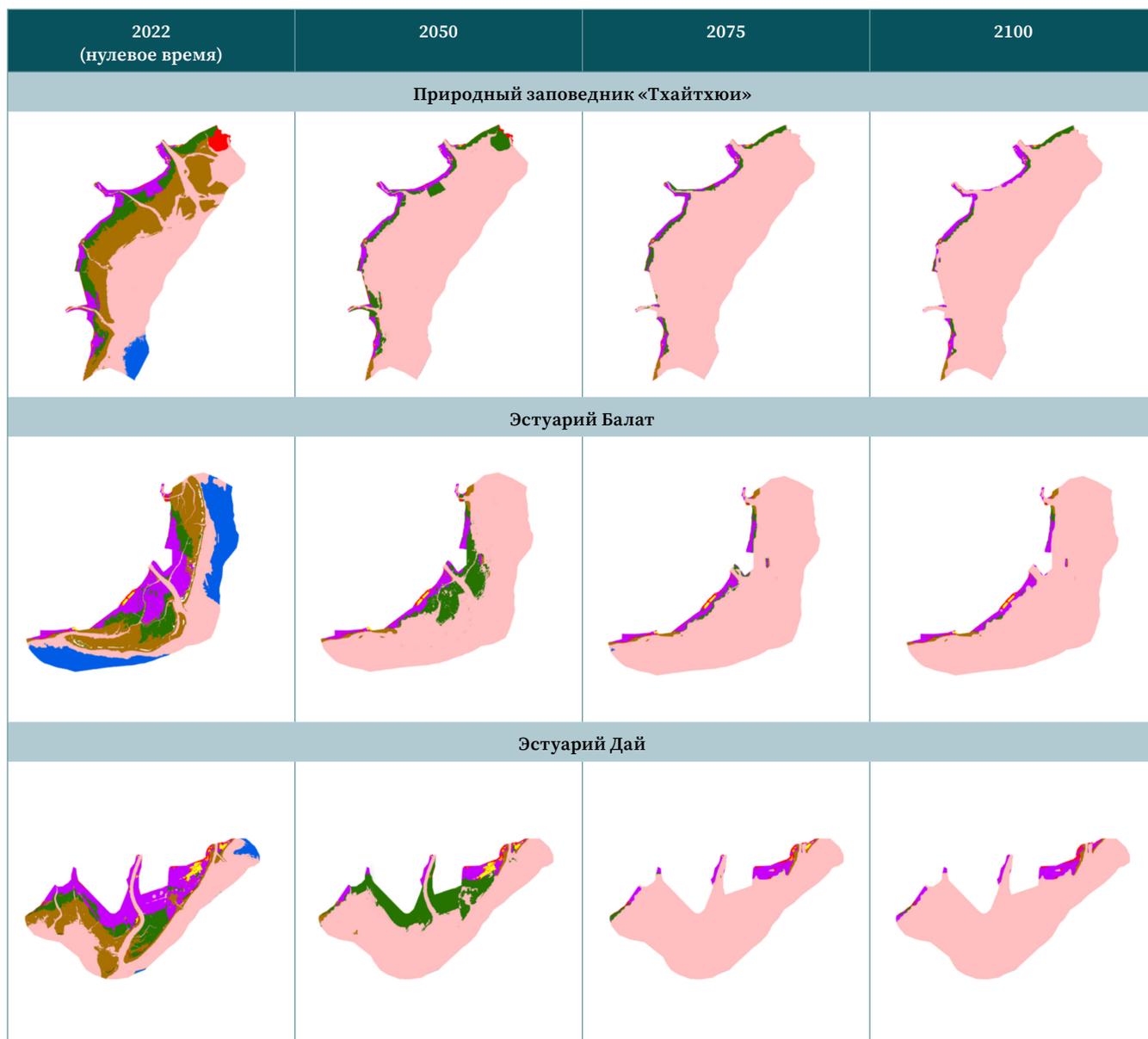
#### 3.1 Прогнозные результаты

На начальном этапе различные типы водно-болотных угодий, включая мангровые леса, прибрежные отмели и земли для аквакультуры, занимали большую площадь и подвергались минимальным изменениям. Прогнозируемый сценарий был установлен при условии отсутствия мер защиты (*англ.* Protect None), при этом все ячейки могли быть затоплены и преобразованы в другие типы экосистем в моделировании. В данном исследовании был выбран сценарий без защиты для наиболее точной оценки на основе самого пессимистичного сценария Министерства природных ресурсов и окружающей среды Вьетнама, а именно сценария RCP8.5 (табл. 2). Результаты анализа показали, что общая тенденция изменений типов водно-болотных угодий трансформируется с повышением уровня моря, что явно выражается в изменениях использования земель по модели SLAMM от начального момента до конца века при сценарии SLR8.5 Министерства природных ресурсов и окружающей среды Вьетнама в сочетании с симуляцией сценария Protect None (рис. 6).

**Таблица 2**  Прогноз изменения площади различных типов водно-болотных угодий в дельте Красной реки по годам, га

**Table 2** Forecast of changes in the area of different types of the Red River Delta wetlands by year, hectares

Типы водно-болотных угодий по категории SLAMM	Природный заповедник «Тхайтхюй»				Эстуарий Балат				Эстуарий Дай			
	2022 г.	2050 г.	2075 г.	2100 г.	2022 г.	2050 г.	2075 г.	2100 г.	2022 г.	2050 г.	2075 г.	2100 г.
Освоенная суша	1088,38	407,26	226,84	185,75	241,26	206,47	198,31	198,31	445,95	236,51	240,68	240,68
Неосвоенная суша	46,42	46,42	40,91	40,91	119,33	89,14	84,31	84,31	371,90	285,98	62,75	1254,01
Внутренние пресноводные болота	3397,79	2100,63	1560,76	1606,34	4687,05	1587,61	1270,54	1270,54	5555,05	1056,38	452,72	0,00
Переходные солончаковые болота	0,40	0,50	0,30	0,23	12,55	0,27	0,22	0,22	0,03	0,03	0,03	0,03
Мангровые леса	4941,53	3496,92	1714,41	1059,78	2991,33	3453,43	510,98	190,56	2863,81	5080,99	127,84	47,12
Приливно-отливные отмели	13 811,63	384,45	251,75	254,79	6952,02	587,04	422,97	422,97	5194,22	364,00	191,03	191,03
Скалистая приливно-отливная зона	13,91	11,87	9,99	9,99	313,98	1,76	1,14	1,14	20,22	5,20	5,05	5,05
Открытые воды эстуария	22 488,00	41 070,19	43 713,54	44 360,53	8721,48	25 502,89	28 940,11	29 260,54	11 027,17	18 908,01	24 856,99	24 199,17
Открытый океан	1730,26	0,00	0,00	0,00	7389,61	0,00	0,00	0,00	458,75	0,00	0,00	0,00



**Рис. 6** Результаты прогнозирования SLAMM в дельте Красной реки с 2022 по 2100 г. по сценарию RCP8.5 с повышением уровня моря на 1 м

**Fig. 6** Results of SLAMM forecasting for the Red River Delta from 2022 to 2100 under the RCP8.5 scenario with a 1-meter sea-level rise

**Условные обозначения**

- |                           |                                      |
|---------------------------|--------------------------------------|
| мангровые заросли         | постоянные морские мелководья        |
| соляное болото            | каменистые морские побережья         |
| приливные отмели          | сезонные сельскохозяйственные угодья |
| аквакультуры              | не водно-болотные угодья             |
| постоянные воды эстуариев |                                      |

### 3.2 Анализ изменений

Таблица данных ясно показывает изменение площади различных типов водно-болотных угодий в процентах на трех исследуемых участках: в природном заповеднике «Тхайтхю», устье реки Балат и устье реки Дай с 2022 по 2100 год, отражая влияние изменения климата и подъема уровня моря. Прежде всего, рассмотрим площадь освоенной суши. В природном заповеднике «Тхайтхю» наблюдается ее резкое снижение с 1088,38 га в 2022 году до 185,75 га в 2100 году (на 83,0 %). В устье реки Балат она сокращается с 241,26 до 198,31 га (снижение на 17,8 %), в устье реки Дай — с 445,95 до 240,68 га (снижение на 46,0 %). Что касается неосвоенной суши, в природном заповеднике «Тхайтхю» она сначала

сохраняет стабильный уровень, но затем ее площадь уменьшается с 46,42 га в 2022 г. до 40,91 га в 2100 г. (снижение на 11,1 %). В устье реки Балат площадь таких земель сокращается с 119,33 до 84,31 га (снижение на 29,4 %), в устье реки Дай они демонстрируют резкий рост: с 62,75 до 1254,01 га (увеличение на 1998,4 %).

Площадь внутренних пресноводных болот в природном заповеднике «Тхайтхюи» сокращается с 3397,79 до 1606,34 га (снижение на 52,8 %), в устье реки Балат — с 4687,05 до 1270,54 га (снижение на 72,8 %). Особенно примечательно, что устье реки Дай теряет всю площадь внутренних пресноводных болот — с 5555,05 до 0 га к 2100 году (снижение на 100,0 %). Площадь переходных солончаковых болот остается очень маленькой и не изменяется существенно в трех регионах. Что касается мангровых лесов, в природном заповеднике «Тхайтхюи» наблюдается их резкое сокращение с 4941,53 до 1059,78 га (на 78,6 %), что указывает на серьезное воздействие подъема уровня моря на мангровые экосистемы. В устье реки Балат площадь мангровых лесов сокращается с 2991,33 до 190,56 га (снижение на 93,6 %). Напротив, в устье реки Дай показан сильный рост мангровых лесов с 2863,81 в 2022 году до 5080,99 га в 2050 году, но их площадь резко сокращается до 47,12 га к 2100 году (снижение на 98,4 %). Изменение площади приливно-отливных отмелей также заслуживает внимания. Заметно их отчетливое сокращение в природном заповеднике «Тхайтхюи» — с 13811,63 до 254,79 га (снижение на 98,2 %), в устье реки Балат — с 6952,02 до 422,97 га (на 93,9 %), в устье реки Дай — с 5194,22 до 191,03 га (на 96,3 %). Это свидетельствует о постепенной потере прибрежных отмелей под воздействием подъема уровня моря.

Площадь скалистой приливно-отливной зоны также сокращается в трех регионах: в природном заповеднике «Тхайтхюи» — с 13,91 до 9,99 га (снижение на 28,1 %), в устье реки Балат — с 313,98 до 1,14 га (на 99,6 %), в устье реки Дай — с 20,22 до 5,05 га (на 75,0 %). Что касается открытых вод эстуария, в природном заповеднике «Тхайтхюи» наблюдается увеличение их площади с 22 488,00 до 44 360,53 га (увеличение на 97,1 %), что отражает увеличение площади водной поверхности, когда затопляются другие водно-болотные угодья. Устья рек Балат и Дай демонстрируют значительное увеличение площади открытых вод эстуария: с 8721,48 до 29 260,54 га (увеличение на 234,1 %) и с 11 027,17 до 24 199,17 га (на 119,3 %) соответственно. Наконец, площадь открытого океана изменяется только в природном заповеднике «Тхайтхюи» и в устье реки Балат, в то время как в устье реки Дай этой площади не наблюдается в 2075 и 2100 годах.

## 4 Выводы

Модель SLAMM четко продемонстрировала серьезное воздействие повышения уровня моря на экосистемы водно-болотных угодий в районе дельты Красной реки, особенно в таких ключевых зонах, как природный заповедник «Тхайтхюи», устья рек Балат и Дай. Изменения площади водно-болотных угодий в названных природных заповедниках, играющих важнейшую роль в охране окружающей среды и поддержании биологического разнообразия, указывают на большие проблемы в сохранении и восстановлении этих важных экосистем.

Так, природный заповедник «Тхайтхюи», являющийся одной из ключевых зон для сохранения флоры и фауны, столкнется с резким сокращением площади освоенной суши, в частности сельскохозяйственных и жилых земель. Повышение уровня моря в этом районе может привести к утрате ценных природных ресурсов и нанести ущерб природным средам. Площадь водно-болотных угодий, таких как мангровые леса и внутренние болота, которые играют важную роль в защите побережья и предоставлении экосистемных услуг, значительно уменьшится.

В устье рек Балат и Дай повышение уровня моря также приведет к существенным изменениям площади водно-болотных угодий, что превратит эти территории в открытые водоемы. Данные изменения могут повлиять на экологическую

функцию этих районов. Несмотря на то что изменения площади водно-болотных угодий варьируются от региона к региону, переход от экосистем водно-болотных угодий к другим формам использования земель неизбежен под воздействием повышения уровня моря.

Увеличение площади открытых водоемов в устье рек и на побережье отражает важный тренд в трансформации использования земель, вызванный повышением уровня моря. Это может привести к потере важных экосистемных услуг, таких как рыболовство и регулирование климата. Данная проблема будет особенно актуальной в тех районах, которые не будут эффективно защищены, как, например, природный заповедник «Тхайтхюи», устья рек Балат и Дай. Результаты исследования показывают: если своевременно не принять меры защиты, площадь водно-болотных угодий в этих районах продолжит сокращаться, что приведет к невосполнимым потерям экосистем и природных ресурсов. Для смягчения этих воздействий крайне необходимы меры защиты и адаптации, в том числе строительство инфраструктуры для предотвращения эрозии, защита мангровых лесов и повышение осведомленности общественности. Регулярные исследования и мониторинг помогут своевременно скорректировать стратегии охраны в условиях продолжающегося повышения уровня моря.

Кроме того, результаты исследования подчеркивают необходимость прогнозирования будущих изменений уровня моря, особенно с учетом таких сценариев, как RCP8.5, для разработки стратегий охраны окружающей среды и устойчивого развития прибрежных территорий. Правительствам и заинтересованным организациям необходимо активно внедрять долгосрочные защитные меры, а также усиливать международное сотрудничество для реагирования на вызовы, связанные с повышением уровня моря и глобальными изменениями климата.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю Василию Александровичу Малинникову за всестороннюю поддержку и ценные рекомендации, которые во многом способствовали проведению данного исследования, а также за методологические советы, предложения по корректировке структуры работы и внимательное отношение к деталям, что оказало значительное влияние на качество полученных результатов. Высокий профессионализм Василия Александровича, его научная компетентность и готовность к обсуждению сложных вопросов стали важными факторами успешного завершения исследования.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Đoàn T.T.H., Phạm T.T., Trần T.P. Suy thoái hệ sinh thái toàn cầu và giải pháp phục hồi hệ sinh thái cho Việt Nam // Tạp chí Khoa học Biến đổi khí hậu. 2022. Số. 22. Tr. 17–25. DOI:10.55659/2525-2496/22.71057.
2. Đạt T.Q., Likitdecharote K., Trung N.H. Mô phỏng xâm nhập mặn Đồng bằng sông Cửu Long dưới tác động mực nước biển dâng và sự suy giảm lưu lượng từ thượng nguồn // Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ. 2012. Số. 21. Tr. 141–150.
3. Nguyễn Đ.Đ., Đoàn T.T.H. Giải pháp phục hồi hệ sinh thái và đa dạng sinh học cho Việt Nam // Nghiên cứu Địa lý nhân văn. 2021. Số. 4. Tr. 81–90.
4. Clough J., Polaczyk A., Propato M. Modeling the potential effects of sea-level rise on the coast of New York: Integrating mechanistic accretion and stochastic uncertainty // Environmental Modelling & Software. 2016. Vol. 84. P. 349–362. DOI:10.1016/j.envsoft.2016.06.023.
5. Akumu C.E., Pathirana S., Baban S., et al. Examining the potential impacts of sea level rise on coastal wetlands in north-eastern NSW, Australia // Journal of Coastal Conservation. 2011. Vol. 15. P. 15–22. DOI:10.1007/s11852-010-0114-3.
6. Payo A., Mukhopadhyay A., Hazra S., et al. Projected changes in area of the Sundarban mangrove forest in Bangladesh due to SLR by 2100 // Climatic Change. 2016. Vol. 139. P. 279–291. DOI:10.1007/s10584-016-1769-z.
7. Cole Ekberg M.L., Raposa K.B., Ferguson W.S., et al. Development and application of a method to identify salt marsh vulnerability to sea level rise // Estuaries and Coasts. 2017. Vol. 40. P. 694–710. DOI:10.1007/s12237-017-0219-0.
8. Fernandez-Nunez M., Burningham H., Díaz-Cuevas P., et al. Evaluating the response of Mediterranean-Atlantic salt marshes to sea-level rise // Resources. 2019. Vol. 8. No. 1. P. 50. DOI:10.3390/resources8010050.

9. Dang A.T., Reid M., Kumar L. Assessing potential impacts of sea level rise on mangrove ecosystems in the Mekong Delta, Vietnam // *Regional Environmental Change*. 2022. Vol. 22. No. 2. P. 70. DOI:10.1007/s10113-022-01925-z.
10. Cooper H., Zhang C. Vulnerability Analysis of Coastal Everglades to Sea Level Rise Using SLAMM // *Multi-Sensor System Applications in the Everglades Ecosystem*. Boca Raton: CRC Press, 2020. P. 259–272.
11. Familkhalili R., Davis J., Currin C.A., et al. Quantifying the benefits of wetland restoration under projected sea level rise // *Frontiers in Marine Science*. 2023. Vol. 10. P. 1–15. DOI:10.3389/fmars.2023.1187276.
12. Quoc L.H. Tiếp cận địa lý trong phân vùng chức năng không gian ven biển huyện Hải Hậu-Nghĩa Hưng, tỉnh Nam Định // *Tạp chí khoa học Tài nguyên và Môi trường*. 2017. Số. 15. Tr. 14–25.
13. Wu W., Yeager K.M., Peterson M.S., et al. Neutral models as a way to evaluate the Sea Level Affecting Marshes Model (SLAMM) // *Ecological Modelling*. 2015. Vol. 303. P. 55–69. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2015.02.008.
14. Куен Д.Т., Малинников В.А. Классификация устьевых и прибрежных водно-болотных угодий по снимкам Planet NICFI на основе сверточных нейронных сетей и трансферного обучения // *Геодезия и картография*. 2024. № 6. С. 31–42. DOI:10.22389/0016-7126-2024-1008-6-31-42.
15. Krauss K.W., McKee K.L., Lovelock C.E., et al. How mangrove forests adjust to rising sea level // *New Phytologist*. 2014. Vol. 202. No. 1. P. 19–34. DOI:10.1111/nph.12605.
16. Hai H.Đ., Trong H.G., Tuan P.V., et al. Nghiên cứu phương pháp quy chuyển độ cao giữa hải đồ và bản đồ địa hình biển dựa trên thủy triều tại khu vực Vịnh Bắc Bộ // *Tạp chí khí tượng thủy văn*. 2023. Số. 752. Tr. 51–60.
17. Saintilan N., Khan N.S., Ashe E., et al. Thresholds of mangrove survival under rapid sea level rise // *Science*. 2020. Vol. 368. P. 1118–1121. DOI:10.1126/science.aba2656.

**АВТОР Куен Динь Туен**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»  
(МИИГАиК), Москва, Россия  
кафедра космического мониторинга и экологии, картографический факультет  
 0000-0002-6577-0087

Поступила 17.11.2024. Принята к публикации 23.06.2025. Опубликовано 30.06.2025.



# Prediction of changes in coastal wetland types due to sea-level rise using the SLAMM model

Quyên Dinh Tuyen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
 quyendinh TUYEN97@mail.ru

**CITATION** Quyên Dinh Tuyen. Prediction of changes in coastal wetland types due to sea-level rise using the SLAMM model. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(3): 44–60. DOI:10.30533/GiA-2025-020.

**KEYWORDS** coastal wetlands, SLAMM, sea-level rise, climate change, Red River Delta, prediction, Vietnam

**ABSTRACT** Wetland ecosystems are essential for maintaining ecological balance by fulfilling functions such as water filtration, carbon storage, and flood protection. However, climate change and sea level rise threaten these ecosystems, particularly in coastal regions. This research examines the impact of sea level rise on wetland ecosystems in the interprovincial biosphere reserve of the Red River Delta (Vietnam) using the SLAMM (Sea Level Affecting Marshes Model). To simulate changes in the ecosystems, wetland maps classified based on PlanetScope satellite imagery (2016–2022) with a resolution of 4.77 meters and featuring 9 land categories were used. These maps, processed using deep learning techniques, were converted into the SLAMM format. The scenario applied in this research is based on RCP8.5, developed by Vietnam's Ministry of Natural Resources and Environment, which forecasts a sea level rise of 1 meter by 2100. According to the developed scenarios, sea level rise will cause significant changes in the distribution of wetland ecosystems, especially mangroves and tidal flats. These results are vital for designing adaptive measures and sustainable management strategies for coastal ecosystems.

**ACKNOWLEDGEMENTS** The author expresses deep gratitude to his research advisor, V.A. Malinnikov, for his comprehensive support and valuable recommendations that greatly contributed to the conduct of this study. Special thanks are extended for his methodological guidance, suggestions for improving the structure of the work, and attentive consideration of details, which significantly influenced the quality of the results obtained. Vasilij Alexandrovich's high professionalism, scientific expertise, and willingness to discuss complex issues were key factors in the successful completion of this research.

REFERENCES

1. Đoàn TTH, Phạm TT, Trần TP. Suy thoái hệ sinh thái toàn cầu và giải pháp phục hồi hệ sinh thái cho Việt Nam [Global ecosystem degradation and solutions for ecosystem restoration for Vietnam]. *Journal of Climate Change science*. 2022;22: 17–25. (In Vietnamese). DOI:10.55659/2525-2496/22.71057.
2. Đạt TQ, Likitdecharote K, Trung NH. Mô phỏng xâm nhập mặn Đồng bằng sông Cửu Long dưới tác động mực nước biển dâng và sự suy giảm lưu lượng từ thượng nguồn [Simulation of saltwater intrusion in the Mekong Delta under the impact of sea level rise and upstream flow reduction]. *Can Tho University Journal of Science*. 2012. Số. 21. Tr. 141–150. (In Vietnamese).
3. Nguyễn ĐĐ, Đoàn TTH. Giải pháp phục hồi hệ sinh thái và đa dạng sinh học cho Việt Nam [Solutions to ecosystem restoration and biodiversity for Vietnam]. *Human Geography Review*. 2021;4: 81–90. (In Vietnamese).
4. Clough J, Polaczyk A, Propato M. Modeling the potential effects of sea-level rise on the coast of New York: Integrating mechanistic accretion and stochastic uncertainty. *Environmental Modelling & Software*. 2016;84: 349–362. DOI:10.1016/j.envsoft.2016.06.023.
5. Akumu CE, Pathirana S, Baban S, et al. Examining the potential impacts of sea level rise on coastal wetlands in north-eastern NSW, Australia. *Journal of Coastal Conservation*. 2011;15: 15–22. DOI:10.1007/s11852-010-0114-3.
6. Payo A, Mukhopadhyay A, Hazra S, et al. Projected changes in area of the Sundarban mangrove forest in Bangladesh due to SLR by 2100. *Climatic Change*. 2016;139: 279–291. DOI:10.1007/s10584-016-1769-z.
7. Cole Ekberg ML, Raposa KB, Ferguson WS, et al. Development and application of a method to identify salt marsh vulnerability to sea level rise. *Estuaries and Coasts*. 2017;40: 694–710. DOI:10.1007/s12237-017-0219-0.
8. Fernandez-Nunez M, Burningham H, Díaz-Cuevas P, et al. Evaluating the response of Mediterranean-Atlantic salt marshes to sea-level rise. *Resources*. 2019;8(1): 50. DOI:10.3390/resources8010050.
9. Dang AT, Reid M, Kumar L. Assessing potential impacts of sea level rise on mangrove ecosystems in the Mekong Delta, Vietnam. *Regional Environmental Change*. 2022;22(2): 70. DOI:10.1007/s10113-022-01925-z.
10. Cooper H, Zhang C. Vulnerability Analysis of Coastal Everglades to Sea Level Rise Using SLAMM. *Multi-Sensor System Applications in the Everglades Ecosystem*. Boca Raton: CRC Press; 2020: 259–272.
11. Familkhalili R, Davis J, Currin CA, et al. Quantifying the benefits of wetland restoration under projected sea level rise. *Frontiers in Marine Science*. 2023;10: 1–15. DOI:10.3389/fmars.2023.1187276.
12. Quốc LH. Tiếp cận địa lý trong phân vùng chức năng không gian ven biển huyện Hải Hậu-Nghĩa Hưng, tỉnh Nam Định [Geographical access in functional spatial zoning in coastal districts of Hai Hau and Nghia Hung – Nam Dinh province]. *Science resources and environment*. 2017;15: 14–25. (In Vietnamese).
13. Wu W, Yeager KM, Peterson MS, et al. Neutral models as a way to evaluate the Sea Level Affecting Marshes Model (SLAMM). *Ecological Modelling*. 2015;303: 55–69. DOI:10.1016/j.ecolmodel.2015.02.008.
14. Quyen DT, Malinnikov VA. Klassifikacija ust'evyh i pribrezhnyh vodno-bolotnyh ugodij po snimkam Planet NICFI na osnove svertochnyh nejronnyh setej i transfernogo obuchenija [Classification of estuaries and coastal wetlands from Planet-NICFI imagery based on convolutional neural networks and transfer training]. *Geodesy and Cartography*. 2024;6: 31–42. DOI:10.22389/0016-7126-2024-1008-6-31-42.
15. Krauss KW, McKee KL, Lovelock CE, et al. How mangrove forests adjust to rising sea level. *New Phytologist*. 2014;202: 19–34. DOI:10.1111/nph.12605.
16. Hải ND, Trọng NG, Tuấn PV, et al. Nghiên cứu phương pháp chuyển đổi độ cao giữa hải đồ và bản đồ địa hình đáy biển dựa trên dữ liệu thủy triều ở Vịnh Bắc Bộ [Method for vertical datum conversion between nautical charts and topographic maps based on tidal data in the Gulf of Tonkin]. *Scientific and Technical Hydro-Meteorological Journal*. 2023;752: 51–60.
17. Saintilan N, Khan NS, Ashe E, et al. Thresholds of mangrove survival under rapid sea level rise. *Science*. 2020;368: 1118–1121. DOI:10.1126/science.aba2656.

**AUTHOR** **Quyen Dinh Tuyen**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

Department of Space Monitoring and Ecology, Faculty of Cartography

 0000-0002-6577-0087

**Submitted: November 17, 2024. Accepted: June 23, 2025. Published: June 30, 2025.**