——— МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ ——

УДК 639.4

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗОСТЕРЫ ВО ВНУТРЕННИХ БУХТАХ ЗАЛИВА ПОСЬЕТА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ГИДРОДИНАМИКИ И ТРАНСПОРТА НАНОСОВ

© 2024 г. С. В. Катрасов^{1, *}, А. Н. Бугаец¹, В. В. Жариков¹, С. М. Краснопеев¹, А. М. Лебедев¹, В. А. Майнулов²

¹Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток, Россия

> ²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия *e-mail: sergey_katrasov@mail.ru Поступила в редакцию 29.06.23 г. После доработки 18.10.23 г. Принята к публикации 16.11.23 г.

С целью объяснения характера пространственного распространения зостеры во внутренних бухтах залива Посьета выполнены численные эксперименты по моделированию гидродинамики и морфодинамических процессов. Гидродинамическое моделирование выполнено помощью модели Delft3D Flow. Для расчета параметров ветрового волнения (направление распространения, длины и высоты волн, придонных орбитальных скоростей) использована спектральная волновая модель SWAN (Simulating WAves Near shore). Расчет перестройки рельефа дна под действием ветровых волн и гидродинамического воздействия приливных и ветровых течений выполнен с помощью программного комплекса Delft3D. Результаты численных экспериментов показали, что динамика прибрежного рельефа дна определяется характером перемещения наносов в береговой зоне под совместным воздействием волн и течений. Сопоставление результатов моделирования с данными о распространении зостеры показало высокую согласованность с модельными расчетами размыва и аккумуляции в береговой зоне.

Ключевые слова: моделирование, Delft3D, морфодинамика, зостера **DOI:** 10.31857/S0030157424020109 **EDN:** RUTHYW

ВВЕДЕНИЕ

Морские травы играют огромную роль как продуценты органического вещества и являются базовым трофическим звеном в экосистемах прибрежных зон [2, 20, 21, 26]. Заросли морской травы Zostera marina являются одним из основных источников первичной пролукции в мелковольях шельфовой зоны. Произрастая на подвижных рыхлых грунтах, поля зостеры стабилизируют их, снижая скорости течения и ослабляя энергию волн [23, 24]. Прибрежные экосистемы морских трав способны фиксировать углекислый газ при фотосинтезе и хранить органический углерод и в биомассе растений, и в донных отложениях. За счет накопления и захоронения органики в осадках морские травы способны влиять на глобальные изменения климата [27]. Для оценок запасов углерода в отдельных акваториях необходимы

данные о занятых морскими травами площадях. Изучение закономерностей распространения, экологии и биологии морских трав, в том числе зостеры, является актуальной задачей управления морскими прибрежными территориями и их развития, а также создания научно-обоснованных методов управления морскими хозяйствами.

В настоящий момент наиболее распространенным методом картографирования, оценки состояния и мониторинга экосистем морских акватории является проведение натурных обследований в сочетании с обработкой данных дистанционного зондирования (ДДЗ). Результаты натурных обследований позволяют сделать достаточно точные выводы о состоянии и плотности проективного покрытия морских трав на момент съемки, однако возможности подобных обследований достаточно ограничены. Кратковременные экспедиционные обследования не могут обеспечить необходимую точность статистических характеристик ограничивающих факторов среды обитания морских трав. Данные дистанционного зондирования могут быть получены с достаточным для целей картографирования и фиксации изменений пространственного распределения морских трав разрешением. В данном случае следует отметить зависимость итогового результата от конкретного типа ДДЗ и алгоритмов их обработки, так как точность оконтуривания и регистрания картографируемых признаков растительности зависят от пространственного и спектрального разрешения исходных снимков [9]. Совместное использование указанных выше данных в рамках различных статистических моделей повышает точность фиксации границ распространения морских трав, однако для объяснения динамики и взаимодействия основных факторов, влияющих на их распространение, этой информации во многих случаях оказывается нелостаточно.

Кроме этого, важными факторами, влияющими на распространение морских трав, является наличие подходящего субстрата и умеренного воздействия волновых и приливных течений [17, 22]. Учет влияния каждого из этих факторов, изучение характера их пространственно-временной изменчивости и эффекта интегрального воздействия остается сложной научной проблемой. В связи с этим актуальной залачей является создание методов районирования прибрежных территорий на основе данных гидрологических и гидробиологических исследований с привлечением результатов численного моделирования, позволяющих объективно учесть динамику физических ограничений (абиотических факторов), влияющих на условия произрастания зостеры.

В данном исследовании для оценки влияния абиотических факторов на характер пространственного распространения зостеры в бухтах Экспедиции и Новгородская (залив Петра Великого, Японское море) с помощью комплекса моделей, входящих в программный пакет Delft3D (https:// www.deltares.nl/en/) [25], выполнены численные эксперименты моделирования гидродинамических и морфодинамических процессов. Для расчета параметров ветрового волнения (направление распространения, длины и высоты волн, придонных орбитальных скоростей) использована спектральная волновая модель SWAN (Simulating WAves Near shore) [18]. Расчет перестройки рельефа дна и транспорта взвешенных наносов под действием ветровых волн и гидродинамического воздействия прилива выполнен с помощью модуля морфодинамики Delft-MOR [30]. Выполнено сопоставление пространственного распространения зостеры по данным литературных источни-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

ков, натурных обследований и ДДЗ с модельными расчетами размыва и аккумуляции в береговой зоне.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования включает внутренние бухты залива Посьета — бухты Экспедиции и Новгородскую (рис. 1). Бухта Экспедиции расположена к северо-западу от косы Назимова. Южным входным мысом бухты является мыс Назимова, а северным — мыс Шелеха, представляющий собой южную оконечность Новгородского полуострова. Площадь бухты составляет 94.5 км², средняя глубина — 3 м [10]. Дно бухты в основном покрыто мелкоалевритовыми илами, образованными в результате выноса речных наносов р. Туманной (площадь водосбора ~33 тыс. км²) в период послеледниковой трансгрессии, когда она несла свои воды в бухту Экспедиции [15]. Характерными элементами рельефа дна являются рифы биогенного происхождения (устричные банки). Они локально располагаются среди илистой равнины, образуя целые системы рифовых построек высотой от 0.4 до 6.0 м. Общий фон осадков в береговой зоне образован мелкими песками, в центральной части доминируют илы, вокруг мысов залегают гравийно-галечные отложения [11, 12]. Конфигурация береговой линии и подводные возвышения в центральной части бухты создают сложную схему течений, состоящую из квазистационарных циклонических и антициклонических циркуляций.

Вход в бухту Новгородская находится напротив оконечности косы Назимова, между бухтами Рейд Паллада и Экспедиции (рис. 1). Общая площадь бухты 32.5 км². На северном берегу бухты между мысом Шелеха и мысом Усольцева расположен морской порт Посьет. Длина бухты около 12 км, ширина в узкой западной части 1–1.5 км, средние глубины около 10 м. В восточной оконечности она округло расширяется до 4 км, средняя глубина не превышает 3 м, берег вершины бухты образован узким, низким, сложенным из валунов перешейком, который соединяет полуостров Краббе с материком.

Климат в районе исследований умеренный муссонный, зимой преобладают северные ветра, обуславливающие холодную, ясную погоду, в теплый период года преобладают южные ветра с Тихого океана. Среднемесячные скорости ветра зимой составляют 4–6 м/с, летом 3–4 м/с. В теплый период года наблюдается 10–13 дней с сильным (>15 м/с) ветром. Прозрачность и цвет воды заметно меняются от открытой части залива к внутренним бухтам. Летом прозрачность вод в открытой части колеблется в пределах 7.0–



Рис. 1. Район исследования — батиметрия внутренних бухт зал. Посьет — Рейд Паллада, Экспедиция и Новогородская, устричные банки, точки полевого обследования плотности зарослей зостеры.

16.0 м, в б. Рейд Паллада — 2.5–10.0 м, в закрытых мелководных бухтах — 1.5–4.0 м [6, 7].

Приливы имеют неправильный полусуточный период, средняя величина составляет 0.2 м, максимальная — 0.7 м. Скорости приливных течений составляют 0.05-0.13 м/с, в проливах 0.35-0.40 м/с. Бухты Экспедиции и Новгородская сообщаются с открытой частью залива (б. Рейд Паллада) через узкий пролив, сформированный косой Назимова, водообмен через пролив сильно ограничен и зависит, главным образом, от мощности поступающего с северо-востока потока, воды которого проникают в систему внутренних бухт вдоль п-ова Краббе и питают циклонический круговорот в б. Рейд Паллада. Во внутренних бухтах наблюдается четко выраженный реверсивный характер движения вод, зачастую охватывающий весь профиль пролива в узкостях бухт. Средние скорости течений в бухтах не превышают 0.05 м/с, в проливах — до 0.05-0.14 м/с [7, 13].

Волновые и дрейфовые потоки возникают под действием ветров более 10 м/с, в мелководной части бухт они могут охватывать всю толщу вод. Средние скорости ветровых течений составляют 0.15–0.20 м/с. Разгон волн имеет наибольшую протяженность при ветрах южных и северных направлений, поэтому максимальные элементы ветровых волн, как правило, наблюдаются в теплое время года [7]. Максимальную повторяемость (до 97%) имеют волны высотой 0.25–0.75 м.

Продукционные характеристики лугов зостеры [2, 5], пространственное распределение доминирующих видов растительности и их роль в экосистеме залива Посьета [3, 4] детально изучались в серии работ сотрудников Института биологии моря ДВО РАН. Видами-эдификаторами подводных лугов являются Zostera marina и Z. nana. В зарослях морских трав встречается множество видов водорослей — Sargassum pallidum, Laminaria cichorioides, Ulva fenestrata, Ceramium kondoi, Tichocarpus crinitus, Desmarestia viridis, Cladophora stimpsonii Codium fragile, Ptilota filicina и др.

В бухте Новгородской доминирующим видом растительности является Z. marina. На ее заросли, покрывающие около половины всей площади дна, приходится более 90% общей биомассы водной растительности бухты. В бухте Экспедиции поля Z. marina и Z. nana занимают 14.5% площади дна, на эти виды приходится 63 и 25% общей растительной биомассы. В бухте Экспедиции наблюдается так называемый «бордюрный» тип зарастания — водная растительность развивается главным образом в области верхней сублиторали, образуя полосу переменной ширины вдоль берега. Глубина распространения зостеры находится в интервале от 1 до 4 м. В бухте Новгородской зостера полностью покрывает дно мелководной восточной части (рис. 1) [4].

В августе 2021 г. специалистами ТИГ ДВО РАН выполнено обследование дна б. Экспедиции с помощью эхолота Garmin echoMAP 50dv и ка-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

бельной видеокамеры BestWill Cr110-7A. Координаты эхолотных промеров и точек погружения видеокамеры, расположение которых приведено на (рис. 1), определялись в геодезической системе WGS-84. В каждой точке погружения камеры отмечалось присутствие или отсутствие морских трав, площадь проективного покрытия определялась по отношению плошади занятой зарослями к общей площади обзора камеры. Полученные данные промеров использованы при построении цифровой модели рельефа (ЦМР), сведения о распределении и проективном покрытии дна зарослями применялись для определения пространственного распределения морских трав с помошью экспертного лешифрирования спутниковых снимков Sentinel-2, полученных в период отсутствия облачности 01-09.09.2021 (L1C_T52TFN_A023438 20210901T020650 (01.09), L1C_T52TFN_A023481_20210904T021559 (04.09), L1C_T52TFN_A032418_20210906T021027 (06.09) и L1C T52TFN А032461 20210909T021603 (09.09)). Спутниковые снимки Sentinel-2 имеют фиолетовый канал, специально предназначенный для изучения прибрежных вод до глубины 10 м.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве методической основы исследования использован интегрированный пакет программного обеспечения Delft3D, включающий объединенные общим интерфейсом модели течений (Delft3D-Flow), поверхностного волнения (Delft3D-Wave) и морфодинамических процессов (Delft-MOR), позволяющий таким образом рассчитывать эрозию, транспорт и седиментацию набора различных фракций наносов под воздействием приливных и ветро-волновых течений.

Delft3D-Flow Гидродинамический модуль предназначен для 2D-3D-моделирования нестационарных потоков, возникающих в результате приливных и метеорологических факторов. Результаты расчетов Delft3D-Flow используются во всех остальных программных блоках Delft3D, обмен результатами вычислений производится с помощью коммуникационного файла. При моделировании взаимодействия ветрового волнения и течений динамическая связь обеспечивается волновым модулем (Delft3D-WAVE), при морфодинамическом моделировании гидродинамический модуль интегрирован с волновым модулем, модуль седиментации и эрозии — с морфодинамическим.

Delft3D-Wave — программный пакет моделирования ветрового волнения, реализован на базе спектральной ветро-волновой модели третьего

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

поколения SWAN (Simulating WAves Nearshore Model) [18]. SWAN учитывает волновые процессы, формирующиеся под влиянием ветра, гидродинамических факторов и батиметрии, диссипацию волновой энергии, придонное трение, обрушение волн и нелинейные волновые взаимодействия. Модуль расчета морфолинамики Delft-MOR [30] позволяет провести моделирование транспорта отложений с использованием данных численного решения трехмерных уравнений адвекции-диффузии (баланса массы) взвеси. локальных скоростей течений и вихревой диффузии, батиметрии района исследования и типа донных отложений (песок или ил). Моделируется транспорт взвешенных и донных (связанных и несвязанных) отложений.

В качестве информации о батиметрии для построения цифровой модели рельефа дна района исследования использованы отметки глубин и изобаты, оцифрованные с навигационных карт: адм. № 62071, 63000, 63002, 65000, 65004, 68003, 68004, 68006, 68012, 68025, 68036. Программными средствами Delft3d (RGFGRID) для акватории района исследования была сгенерирована прямолинейная расчетная сетка разрешением 30 м (482 × 280 расчетных ячеек). Вертикальное разрешение сетки составляет 3 о-слоя, границы которых установлены в 10% от поверхности и от дна. На открытой границе в б. Рейд Паллада заданы параметры гармонических постоянных прилива (табл. 1) по данным поста "Бухта Постовая" [8, 14]. В табл. 1 используются следующие обозначения волн: M2 – главная лунная полусуточная; S2 – главная солнечная полусуточная; N2 – большая лунная эллиптическая полусуточная; К2 – лунно-солнечная деклинационная полусуточная; К1 – лунно-солнечная деклинационная суточная; О1 – главная лунная суточная; Р1 – главная солнечная суточная; Q1 – большая лунная эллиптическая суточная, М4 – четверть суточная лунная мелководная, MS4 – четверть суточная лунно-солнечная мелководная, М6 – одна шестая суточная лунно-мелководная. Плотность морской воды на открытой границе принята 1025 кг/м³. Соленость на открытой границе задана по материалам [14] как постоянные по глубине значения для летнего сезона 32.5 PSU. Расчетный шаг моделирования 30 с.

Начальные условия для численного эксперимента были сформулированы следующим образом. Нижняя граница задана в виде двух равномерно распределенных по акватории района исследования слоев — нижний слой песка и верхний слой ила толщиной 20 и 5 см соответственно. Средний диаметр и гидравлическая крупность для песка составляют 0.1 мм и 0.01 м/с, для илистых грунтов 0.025 мм и 0.00005 м/с соответственно [16]. Моделирование морфодинамики выпол-

Параметр	M2	S2	N2	K2	K1	01	P1	Q1	M4	MS4	M6
Н, м	0.076	0.033	0.018	0.009	0.056	0.049	0.019	0.01	0.003	0.002	0.001
g°	98	137	74	136	5	328	2	309	47	110	326

Таблица 1. Гармонические постоянные приливов б. Постовая (*H* – амплитуда, *g* – фаза)

нено при установившихся режимах волнения, сформированных стационарными однородными по пространству ветрами четырех основных (N, S, E и W) румбов. Для минимизации влияния начальных условий на результаты расчетов волновой и морфодинамической модели использован 10-дневный период стабилизации модели при средней для района исследований скорости ветра равной 5 м/с и затем расчеты выполнялись для скоростей ветра 15 м/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования выведены с часовым интервалом. По данным моделирования приливная ширкуляция вод в бухтах Новгоролская и Экспедиции формируется под влиянием неправильного полусуточного прилива (рис. 2). Приливная волна из залива Петра Великого проникает во внутренние бухты через проход между мысом Назимова и мысом Астафьева, разделяюшим акватории б. Рейл Паллала и б. Новгоролская и Экспедиции. Приливо-отливные течения носят реверсивный характер, формируя три локальных ветви: кутовая часть бухты Новгородская — бухта Рейд Паллада, северо-восточная кутовая часть бухты Экспедиции — бухта Рейд Паллада и северо-западная часть бухты Экспедиции — бухта Рейл Паллада. Основными факторами. определяющими структуру течений, являются рельеф дна (в том числе расположение устричных банок) и фаза приливо-отливных колебаний.

В прилив, периоды между высокой полной и низкой малой водой, а также между низкой полной и высокой малой водой, формируются струи течений направленные из б. Рейд Паллада к северному побережью б. Экспедиции и кутовой части б. Новгородской. В б. Экспедиции основными особенностями циркуляции является формирование двух потоков, имеющих направления вдоль восточного берега, минуя кутовую часть и устье р. Гладкой, с формированием циклонической циркуляции в районе устричных банок восточнее м. Топкого, далее вдоль северного берега бухты до устья р. Шукановки и вдоль южного и юго-восточного побережья, захватывая центральную часть бухты, образуя циклоническую циркуляцию севернее м. Низкого, до м. Дельта на северном побережье бухты. В б. Новгородской поток направлен в сторону кутовой части с формированием в ней циклонической циркуляции.

Во время отлива, в периоды между высокой полной и низкой малой водой, а также между низкой полной и высокой малой водой, формируются течения, направленные к акватории б. Рейд Паллада. В б. Экспедиции основной особенностью ширкулящии является направленность потоков к центру бухты, с формированием антициклонических циркуляций в районах устричных банок восточнее м. Андреева, западнее м. Дельта и м. Низкий. их слиянием и дальнейшим движением основного потока в б. Рейд Паллада вдоль южного побережья п-ва Краббе и м. Шелеха. В б. Новгородской в кутовой части формируется антициклоническая циркуляция с дальнейшим движением потока в сторону б. Рейд Паллада вдоль главной оси бухты. Максимальные модельные скорости горизонтальных течений в среднем и придонном слое, вызванные приливом, нахолятся в интервале 0.02–0.05 м/с. При ветре 5 м/с значения скоростей течения достигают значений 0.06-0.08 м/с. При штормовых ветрах западных и восточных румбов, обеспечивающих максимальный разгон, придонные горизонтальные скорости могут достичь 0.1 м/с. На мелководных прибрежных участках и над банками влияние приливных и ветровых течений может обеспечивать лишь слабый поступательный транспорт взвеси илистых фракций. Приливные и ветровые течения практически не инициируют процессы размыва и аккумуляции наносов в области литорали.

Ветровое волнение в бухте Экспедиции формируется под влиянием ветра, рельефа дна и конфигурации береговой черты. На большей части акватории направление волнения совпадает



Рис. 2. Схема приливо-отливных течений в бухтах Экспедиции и Новгородская по результатам моделирования.

Nº 2

2024

с направлением ветра, на мелководье вследствие рефракции, направление распространения волн определяется очертаниями береговой линии. При ветрах северо-восточного и юго-западных направлений разгоны волн ограничены, при южных и северных — разгон волн имеет наибольшую протяженность. Максимальные значения высоты волны при средней скорости ветра 5 м/с в центральной части бухты составляют 0.35-0.40 м. На остальной акватории высота волны изменяется в пределах от 0.15 до 0.30 м в направлении от берега к центру бухты. Характерной особенностью поля ветрового волнения в б. Экспедишии является существенное влияние батиметрии на распределение волновых характеристик. Волна развивается в направлении к центральной части бухты, где частично разрушается, проходя через банки, и продолжает движение к подветренному берегу. При скорости ветра 15 м/с наибольшие высоты волн составили 0.8-0.9 м. скорости ветровых течений — 1.1-1.2 м/с соответственно. В бухте Новогородской ветровое волнение имеет однородный характер, максимально высота волн в численном эксперименте при скорости ветра 5 м/с составила 0.25 м, скорости ветровых течений 0.2-0.4 м/с, при скорости ветра 15 м/с максимальная высота волн составила 0.63 м, скорость ветровых течений — 0.98 м/с соответственно.

Отрыв частиц грунта и транспорт взвеси может осуществляться только при совместном воздействии течений и вызванных штормовыми ветрами волн. Орбитальные скорости волн, вызванных средними скоростями ветра (5 м/с), уже способны поднимать илистые фракции, однако в результате смены направлений приливных течений за полупериод (12 ч) поле взвеси не успевает существенно модифицироваться и взвешенные наносы оседают, не покидая пределов расчетных ячеек. Максимальное количество взвеси формируется в подветренных районах при штормовых ветрах (15 м/с) западного направления, обеспечивающих максимальных разгон волн. В течение первого часа развития ветрового волнения в прибрежной части концентрации взвеси могут достигать значений 300-400 кг/м³. Движение наносов определяется главным образом интенсивностью волновой эрозии и переноса взвешенных частиц ветровыми и приливными циркуляционными течениями. Орбитальные волновые скорости обеспечивают отрыв и перемещение частиц в верхние слои, далее взвешенные наносы перераспределяются под воздействием ветровых и приливных течений от прибрежной зоны к центру бухт, где концентрация твердых частиц достигает значений 200-250 кг/м3. После завершения ветрового воздействия полное осаждение взвеси по всей акватории бухт Экспедиции и Новогородской до состояния прозрачной воды происходит в течении 10 суток с характером снижения

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

концентраций близким к экспоненциальному: на 3 сутки до 100–120 кг/м³, на 5 сутки 10–20 кг/м³ и ~ 0.02 кг/м³ на 12 сутки эксперимента.

Сильные штормы вызывают перестройку рельефа береговой отмели и литорали. На рис. 4 представлены результирующие леформации расположенных вдоль прибрежной зоны контрольных поперечных профилей (рис. 3), на 10-е сутки каждого численного эксперимента, расположенные по периметру б. Экспедиции. В течение численных экспериментов поперечные профили берега в результате воздействия штормовых волн за короткое время в основном приобрели S-образный профиль, основная масса смытого в береговой зоне материала перенесена по направлению к центру бухты. В зоне распространения устричных банок и частично в прибрежной полосе при штормовых ветрах западного и юго-западного направлений слой ила был полностью смыт, профили береговых склонов практически достигли не размываемой границы модели (рис. 4). Поскольку корни зостеры обычно располагаются в грунте до глубины 20-30 см, в некоторых областях литорали могут создаваться неблагоприятные условия — корни размыты, и трава вырвана волновым воздействием. В то же время в зоне активного волнового воздействия могут быть выделены зоны, которые не претерпели значимых изменений отметок дна, а также зоны, в которых в результате воздействия течений и волн, вызванных переменными направлениями ветра, может возникать относительное динамическое равновесие берегового профиля. На этих участках развитые растения зостеры способны выжить, а молодые побеги и семена могут быть занесены илом и погибнуть. Зоны постоянной аккумуляции материала можно интерпретировать как неблагоприятные для условий произрастания зостеры.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам всех численных экспериментов, расчетные горизонтальные скорости течения находятся в пределах оптимальных для произрастания морских трав, в том числе зостеры [17]. Они и не могут существенно повлиять на стебли растений, а также вызвать размыв грунта и обнажение корней. По данным [19] в прибрежной зоне на глубинах до 10 м ограниченность или отсутствие освещенности за дневной период приводит к гибели зостеры приблизительно на 30-е сутки. Поскольку повторяемость штормовых ветров в теплый период года соответствует частоте раз в 10 дней [6, 7], можно заключить, что световой режим также не является лимитирующим фактором выживания зостеры в исследуемых бухтах.



Рис. 3. Зоны произрастания зостеры во внутренних бухтах зал. Посьет по данным: 1) работы [3]; дешифрирования ДДЗ — 2) плотные и 3) разряженные заросли; полевого обследования (степень покрытия дна водорослями к общей площади обзора камеры): единичные (<10%); разряженные (>10%) и плотные (до 100%). Контрольные поперечные профили обозначены цифрами. Границы зон 4) устойчивого и 5) потенциально-возможного (максимального распространения) произрастания зостеры выделенные на основе результатов моделирования.

Для объяснения положения границ распространения зостеры, на основе полученных в результате всех численных экспериментов данных о перераспределении наносов в прибрежной зоне, были построены пространственные распределения минимальных и максимальных отметок дна. На результирующих покрытиях выделены зоны отсутствия слоя ила. Минимальные отметки дна верхней сублиторали, на которых отсутствует слой ила, достаточно хорошо соответствуют границам распространения зостеры по данным работы [4] и дешифрированию ДДЗ (рис. 4). Эти границы можно интерпретировать как максимальные границы, в которых зостера может образовывать подводные луга. Выделенные в поле максимальных модельных отметок дна зоны отсутствия слоя ила следует интерпретировать как области, наиболее благоприятные для формирования зарослей зостеры, где морская трава не подвержена негативному воздействию морфодинамических процессов. Над устричными банками по результатам моделирования оба слоя (и ила, и песка) практически полностью смыты, поэтому зостера там жить не может. Ниже глубины 3-4 метров заросли зостеры отсутствуют. Семена зостеры, вынесенные под воздействием гидродинамических факторов из береговой области в центральную часть бухты, при опускании на дно (обычно в конце зимнего периода) попадают в придонный взвешенный слой ила и коллоидных фракций, где погибают. Фактически это исключает возможность колонизации центральной части бухты Экспедиции морскими травами.

При визуальном сопоставлении, большая часть точек обследования (рис. 4), где проективное покрытие зостеры больше нуля, достаточно хорошо соответствует области полностью смытого слоя ила и орбитальных волновых скоростей >0.3-0.35 м/с. В этой зоне наблюдаются vсловия, при которых корни зостеры могут закрепляться в донном грунте, и сама трава не погибнет погребенная под слоем перемещенного вниз по профилю берега материала. Кроме эстуария р. Гладкой (площадь водосбора 458 км²), точки плотного (100%) покрытия хорошо соответствуют выделенным в результате расчетов наиболее благоприятным для формирования зарослей зостеры прибрежным областям. Точки обследования, соответствующие категориям разряженного (>10%) и единичного (<10%) покрытия зостеры, расположены ближе к расчетным границам максимального распространения зостеры.

В кутовой части б. Экспедиции, в районе впадения р. Гладкой, полученные закономерности могут нарушаться в результате выноса терригенного материала реками, который не учтен в численном эксперименте. Также существенное влияние на результаты расчетов может оказывать точность цифровой модели рельефа дна. Дополнительно следует отметить, что данные литературных источников, натурного обследования и спутниковых снимков дают несколько разные сведения о присутствии зостеры для объектов исследования. Это может быть связано с большой гетерогенностью плотности размещения зостеры даже в пределах одного сообщества, а также с межгодовой изменчивостью гидро-



Рис. 4. Изменение отметок дна (м) в контрольных поперечных профилях на конец каждого численного эксперимента. Номера разрезов соответствуют обозначениям на (рис. 3).

метеорологических условий. Изменение площадей и местоположения полей зостеры, локальное исчезновение зарослей и повторная колонизация участков рассматриваются как часть популяционной стратегии этого вида [29], позволяющей зостере восстанавливаться после периодического воздействия разрушающих факторов [28].

При сильных штормах донный ил может быть снова переведен во взвешенное состояние, вынесен к поверхности и включен в систему прибрежной циркуляции главным образом в области литорали и поверхности устричных банок, для которых основным источником поступления илистого материала является твердый сток впадающих в бухты рек. Согласно региональным данным [1], для рек юга Приморского края суточный модуль смыва почвы со склонов водосбора в период прохождения летних паводков может составлять 6.6 т · сут./км² и более. Основная масса смытого материала приносится в б. Экспедиции, водосбор которой составляет ~1200 км². Под воздействием ветро-волновых течений взвешенные наносы перераспределяются по акватории, частично оседают и частично выносятся стоково-приливными

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

течениями в бухты Новгородская и Рейд Паллада. Значительно меньше материала смывается с водосбора б. Новогородской, площадь которого составляет ~50 км², кроме этого, снижение скоростей течений в средней, сильно вытянутой, части б. Новогородская препятствует проникновению взвешенных наносов из б. Экспедиции в ее кутовую часть. Волновое воздействие на литораль в кутовой части незначительное, баланс донных отложений остается относительно постоянным, таким образом, зостера в б. Новогородской не испытывает негативного воздействия от размыва или аккумуляции иловых фракций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании выполнено моделирование морфодинамических процессов во внутренних бухтах залива Посьета с целью определения мест размыва и аккумуляции в результате совместного волнового воздействия и циркуляции приливо-отливных течений, а также использования этих данных с целью объяснения пространственного характера распространения зостеры. Показано, что в резуль-

КАТРАСОВ и др.

тате воздействия волнения, вызванного штормовыми ветрами (15 м/с) четырех основных румбов, в береговой зоне происходит размыв донных отложений и формирование значительного количества взвеси ила и песка, которая под воздействием циркуляционных течений перемещается за пределы прибрежной зоны. Сопоставление данных о распространении зостеры — литературных источников, дешифровки ДДЗ и полевого обследования показало высокую согласованность с результатами моделирования процессов размыва и аккумуляции илистых фракций. Расхождения между результатами расчетов и данными наблюдений прежде всего связаны с точностью цифровой модели рельефа в области литорали. принятыми в численном эксперименте упрощениями относительно начальных условий распределения донных отложений, характера метеорологического воздействия (однородное поле ветра) и большой гетерогенностью плотности размещения зостеры. Зона произрастания зостеры не остается постоянной и может изменяться в зависимости от метеорологических условий каждого года. Границы зон выживаемости и роста могут зависеть от степени развития растений и результирующего баланса наносов. Перспективы развития данного направления исследований связаны с необходимостью использования в моделях более детальных данных о рельефе в прибрежной зоне, распределении донных отложений и дополнительных полевых обследованиях, межгодовой динамики распространения сообществ зостеры.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета ФГБУН Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук (тема государственного задания FWMW-2024-0003). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугаец А.Н., Лупаков С.Ю., Пшеничникова Н.Ф., Краснопеев С.М. Моделирование стока взвешенных наносов по данным Приморской воднобалансовой станции // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 1. С. 28–38.

- 2. Вышкварцев Д.И. Особенности продукционных процессов в мелководных бухтах зал. Посьета (Японское море): Дис. ... канд. биол.наук, Владивосток: Ин-т биологии моря, 1979. 251 с.
- Вышкварцев Д.И. Физико-географическая и гидрохимическая характеристики мелководных бухт залива Посьета // Гидробиологические исследования заливов и бухт Приморья. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. С. 4–11.
- Вышкварцев Д.И., Пешеходько В.М. Картирование доминирующих видов водной растительности и анализ их роли в экосистеме мелководных бухт залива Посьета Японского моря // Подводные гидробиологические исследования. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1982. С. 120–129.
- 5. Вышкварцев Д.И., Пешеходько В.М. Продукционный потенциал доминирующих видов водной растительности в мелководных бухтах залива Посьета (Японское море) // Биологические науки. 1987. № 11. С. 90–95.
- Гидрометеорологические условия шельфовой зоны Японского моря // Тр. ДВНИИГМИ. 1976. Вып. 27. 794 с.
- Григорьева Н.И. Залив Посьета: физико-географическая характеристика, климат, гидрологический режим // Современное экологическое состояние залива Петра Великого Японского моря. Владивосток: Изд. дом Дальневост. федерал. ун-та, 2012. 440 с.
- 8. *Деева Р.А.* Каталог гармонических и негармонических постоянных приливов отечественных вод морей Дальнего Востока. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 249 с.
- 9. Жариков В.В., Базаров К.Ю., Егидарев Е.Г., Лебедев А.М. Использование данных Landsat для картографирования высшей водной растительности дальневосточного морского заповедника // Океанология. 2018. Т. 58. № 3. С. 521–531.
- Лоция северо-западного берега Японского моря от реки Туманная до мыса Белкина. ГУНО. 1984. 316 с.
- 11. *Мануйлов В.А.* Подводные ландшафты залива Петра Великого. Владивосток: Изд-во Дальневосточного университета, 1990. 168 с.
- Мануйлов В.А. Формирование биогенных форм подводного рельефа в береговой зоне Южного Приморья (Японское море) // XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования — в практику берегопользования. Сб. мат. Всеросс. конф. с международным участием. Калининград, 2022. С. 66–68.
- Новожилов А.В., Григорьева Н.И., Вышкварцев Д.И., Лебедев Е.Б. Течения и горизонтальная турбулентность в бухтах залива Посьета (Японское море) // Рациональное использование биоресурсов Тихого океана: тез. докл. Владивосток: ТИНРО, 1991. С. 61–63.
- 14. Супранович Т.И., Якунин Л.П. Гидрология залива Петра Великого // Труды ДВНИГМИ. 1976. Вып. 22. С. 104–105.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024

- 15. Хершберг Л.Б., Михайлик Е.В., Пушкарь В.С., Вачаев Б.И. Строение, вещественный состав илистой толщи шельфа юга Приморья и перспективы ее освоения // Тихоокеанская геология. 2013.Т. 32. № 2. С. 90–99.
- Шапиро Г.И., Акивис Т.М., Пыхов Н.В. Анциферов С.М. Перенос мелкодисперсного осадочного материала мезомасштабными течениями в шельфово-склоновой зоне моря // Океанология. 2000. Т. 40. № 3. С. 333–339.
- Boer W.F. Seagrass-sediment interactions, positive feedbacks and critical thresholds for occurrence: a review // Hydrobiologia. 2007. V. 591, P. 5–24. http:// doi.org/10.1007/s10750-007-0780-9
- Booij N., Ris R. Holthuijsen L. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 7649–7656.
- Dennison W.C., Alberte R.S. Role of daily light period in the depth distribution of Zostera marina (eelgrass) // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1985. V. 25. P. 51–61. http:// doi.org/10.3354/meps025051
- Fourqurean J.W., Duarte C.M., Kennedy H. et al. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock // Nature Geoscience. 2012. V. 5. Iss. 7. P. 505–509.
- Harrison P.G., Mann K.H. Detritus formation from eelgrass (Zostera marina L.): the relative effects of fragmentation, leaching, and decay // Limnol. Oceanog. 1976. V. 20. Iss. 6. P. 924–934. http://doi.org/10.4319/ lo.1975.20.6.0924
- Hirst A.J., Giri K., Ball D., Lee R.S. Determination of the physical drivers of Zostera seagrass distribution using a spatial autoregressive lag model // Mar. Fresh. Res. 2017. V. 68. P. 1752–1763.

- Infantes E., Orfila A., Simarro G. et al. Effect of a seagrass (Posidonia oceanica) meadow on wave propagation // Mar. Ecol. Prog. Ser. 2012. V. 456. P. 63–72. http://doi.org/10.3354/meps09754
- Lei J., Nepf H. Wave damping by flexible vegetation: connecting individual blade dynamics to the meadow scale // Coast. Eng. 2019. V. 147. P. 138–148. http:// doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.01.008
- 25. Lesser G.R., Roelvink J.A., van Kestera J.A.T.M., Stelling G.S. Development and validation of a three-dimensional morphological model // Coastal Engineering. 2004. V. 51. № 8–9. P. 883–915.
- Röhr M.E., Holmer M., Baum J.K. et al. Blue carbon storage capacity of temperate eelgrass (Zostera marina) meadows // Global Biogeochemical Cycles. 2018. V. 32. P. 1457–1475. http://doi.org/10.1029/ 2018GB005941
- Stankovic M., Hayashizaki K.-I., Tuntiprapas P. et al. Two decades of seagrass area change: organic carbon sources and stock // Marine Pollution Bulletin. 2021. V. 163. P. 111913. http://doi.org/10.1016/j. marpolbul.2020.111913
- Tremolieres M. Plant response strategies to stress and disturbance: the case of aquatic plants // Journal of Bioscience. 2004. V. 29. P. 461–470.
- 29. Van Katwijk M.M., Bos A.R., de Jonge V.N. et al. Guidelines for seagrass restoration: importance of habitat selection and donor population, spreading of risks, and ecosystem engineering effects // Marine Pollution Bulletin. 2009. V. 58. P. 179–188.
- Van Ormondt M. The Teignmouth model, Validation and evaluation of Delft3D-MOR with COAST3D Pilot campaign data, WL. Delft Hydraulics report Z2394.20, February 2000.

ASSESSMENT OF THE ABIOTIC FACTORS INFLUENCE ON THE DISTRIBUTION OF ZOSTERA IN THE INTERNAL BAYS OF POSYET GULF BASED ON THE RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION

S. V. Katrasov^{*a*, #}, A. N. Bugaets^{*a*}, V. V. Zharikov^{*a*}, S. M. Krasnopeev^{*a*}, A. M. Lebedev^{*a*}, and V. A. Mainulov^{*b*}

^aPacific Geographical Institute, Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia ^bFar Eastern Federal University, Vladivostok, Russia [#]e-mail: sergey katrasov@mail.ru

In order to explain the spatial nature of the distribution of eelgrass in the inner bays of Posyet Bay, numerical experiments were performed to simulate hydrodynamics and morphodynamic processes. The hydrodynamics was modeled using the Delft3D Flow model. The spectral wave model SWAN (Simulating WAves Near shore) was used to calculate the wind wave parameters (propagation direction, wave length and height, near-bottom orbital velocities). Alteration of coastal zone profile under the impact waves and the hydrodynamic of tidal and wind currents was performed using the Delft3-MOR morphodynamics module included in the Delft3D software package. The results of numerical experiments have shown that the dynamics of the coastal bottom topography is determined by sediment transport forced by combined action of waves and currents. Comparison of the modeling results with information on the distribution of Zostera of previous studies and field surveys data showed a high agreement with model data on the spatial distribution of erosion and accumulation zones in the coastal zone.

Keywords: modeling, Delft3D, morphodynamics, zostera distribution

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 2 2024