

ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТРАНСПОРТА НАНОСОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗОСТЕРЫ В БУХТАХ ЗАЛИВА ПОСЬЕТА: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

С.В. Катрасов¹, А.Н. Бугаец¹, В.В. Жариков¹

¹Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения
Российской Академии наук, г. Владивосток

Аннотация. В данном исследовании с целью объяснения характера пространственного распространения zostеры во внутренних бухтах залива Посьета проведены численные эксперименты по моделированию гидродинамических и морфодинамических процессов. Моделирование гидродинамики бухты осуществлено с помощью модели Delft3D Flow. Для вычисления параметров ветрового волнения (направление распространения, длина и высота волн, придонные орбитальные скорости) применена спектральная волновая модель SWAN (Simulating Waves Nearshore). Расчет трансформации рельефа дна под воздействием ветровых волн и гидродинамического влияния приливных и ветровых течений выполнен с использованием модуля морфодинамики Delft3-MOR, входящего в программный комплекс Delft3D. Результаты численных экспериментов продемонстрировали, что динамика прибрежного рельефа дна определяется характером перемещения наносов в береговой зоне под совместным воздействием волн и течений. Сравнение результатов моделирования с данными о распространении zostеры из литературных источников и полевых обследований показало высокую согласованность с модельными данными пространственного распределения зон размыва и аккумуляции в береговой зоне.

Ключевые слова: моделирование, Delft3D, морфодинамика, zostера.

THE INFLUENCE OF HYDRODYNAMICS AND SEDIMENT TRANSPORT ON THE DISTRIBUTION OF ZOSTERA IN THE BAYS OF POSYET GULF: NUMERICAL MODELING

S.V. Katrasov^{*1}, A.N. Bugaets¹, V.V. Zharikov¹

¹Pacific Geographical Institute, Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
Vladivostok

Annotation. 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.

Введение. Морские травы, такие как *Zostera marina*, играют ключевую роль в экосистемах прибрежных зон, обеспечивая первичную продукцию и стабилизируя грунты [2, 15, 16, 18-21]. Рост и распространение морских водорослей контролируется физическими, химическими и биологическими свойствами окружающей среды. Растворенный кислород, свет, питательные вещества и неорганический углерод, поступающие с морскими течениями,

обеспечивают основные условия для фотосинтеза. В дополнение к этому, важными причинами, определяющими распространение морских трав, являются наличие подходящего субстрата и умеренное воздействие волновых и приливных течений [12]. Анализ влияния каждого из этих факторов, а также изучение их пространственно-временной изменчивости и эффекта комплексного воздействия остаются сложной научной задачей. Поэтому актуальным вопросом является разработка методов районирования прибрежных зон на основе данных гидрологических и гидробиологических исследований с использованием результатов численного моделирования, что позволит объективно учитывать динамику физических ограничений (абиотических факторов), влияющих на условия произрастания zostеры [8].

В данном исследовании для оценки влияния абиотических факторов на распространение zostеры в бухтах Экспедиции и Новгородской использованы численные эксперименты с моделями из пакета Delft3D [17]. Для расчета параметров волн применена модель SWAN [13], а для анализа рельефа дна и транспорта наносов — модуль морфодинамики Delft-MOR [22]. Проведено сопоставление данных о распространении zostеры из литературных источников и ДДЗ с модельными расчетами размыва и аккумуляции.

Объекты и методы исследования. Район исследования включает внутренние бухты залива Посьета — бухты Экспедиции и Новгородская (рис. 1). Бухта Экспедиции, площадью 94.5 км² и средней глубиной 3 м, находится к северо-западу от косы Назимова. Её дно покрыто мелкоалевритовыми илами, образованными речными наносами. В бухте имеются рифы биогенного происхождения, а конфигурация береговой линии создает сложные течения [10, 11]. Бухта Новгородская, площадью 32.5 км², находится между бухтами Рейд Паллада и Экспедиции и имеет длину около 12 км и среднюю глубину 10 м.

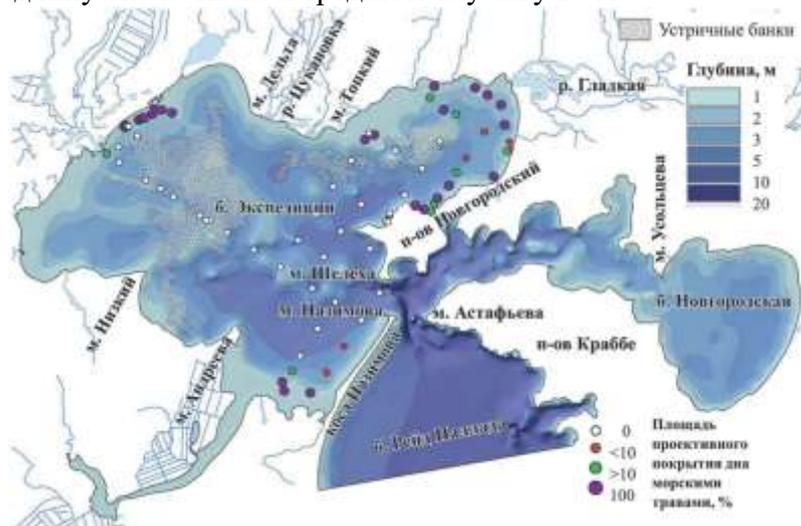


Рис. 1. Район исследования – батиметрия внутренних бухт зал. Посьет – Рейд Паллада, Экспедиция и Новгородская, устричные банки, точки полевого обследования плотности зарослей zostеры.

Климат региона умеренный муссонный, с преобладающими в зимний период северными ветрами и южными в летний. Среднемесячные скорости ветра составляют 4–6 м/с зимой и 3–4 м/с летом. Приливы имеют полусуточный период, средняя величина — 0.2 м, максимальная — 0.7 м. Внутренние бухты сообщаются с открытой частью залива через узкий пролив, водообмен в котором ограничен. Средние скорости течений в бухтах не превышают 0.05 м/с [6]. Волновые потоки возникают при ветрах более 10 м/с, а средние скорости ветровых течений составляют 0.15–0.20 м/с. Продукционные характеристики лугов zostеры и их роль в экосистеме залива Посьета были детально изучены в серии работ сотрудников Института биологии моря ДВО РАН [3, 4, 5]. В бухте Экспедиции zostера развивается в области верхней сублиторали, глубина её распространения – от 1 до 4 м (рис. 1) [4]. В августе 2021 года специалисты ТИГ ДВО РАН провели обследование дна бухты Экспедиции с помощью

погружаемой видеокамеры [8], определяя плотность поселений zostеры по отношению к площади обзора (рис.1).

В исследовании использован интегрированный пакет программного обеспечения Delft3D, который включает модели течений (Delft3D-Flow), поверхностного волнения (Delft3D-Wave) и морфодинамических процессов (Delft-MOR). Это позволяет рассчитывать эрозию, транспорт и седиментацию различных фракций наносов под воздействием приливных и ветровых течений. Модуль Delft3D-Flow предназначен для 2D-3D моделирования нестационарных потоков, возникающих под воздействием приливных и метеорологических факторов. Результаты расчетов используются во всех остальных блоках Delft3D, а обмен данными осуществляется через коммуникационный файл. Модуль Delft3D-Wave основан на спектральной модели SWAN и учитывает волновые процессы, включая диссипацию энергии и взаимодействия волн. Delft-MOR моделирует транспорт отложений с использованием трехмерных уравнений адвекции-диффузии [22].

Для построения цифровой модели рельефа дна использованы данные о глубинах с навигационных карт. Создана расчетная сетка разрешением 30 м, с вертикальным разрешением 3 σ -слоя. На открытой границе заданы параметры гармонических приливов по данным поста бухта Постовая [7], плотность морской воды — 1025 кг/м³, соленость — 32.5 PSU. В начальных условиях учтены два слоя грунта: ил (0.05 м) и песок (0.2 м). Моделирование проводилось при установившихся режимах волнения, с 10-дневным периодом стабилизации модели и расчетами для скоростей ветра 15 м/с.

Результаты и обсуждение. Исходя из результатов гидродинамического моделирования, можно сделать вывод, что приливная циркуляция в бухтах Новгородская и Экспедиции формируется под влиянием неправильного полусуточного прилива. Приливная волна проникает во внутренние бухты через проход между мысами Назимова и Астафьева, создавая реверсивные течения и три локальные ветви. Основные факторы, определяющие структуру течений, рельеф дна и фаза приливо-отливных колебаний. В прилив формируются струи течений, направленные из бухты Рейд Паллада к северному побережью Экспедиции и кутовой части Новгородской. В Экспедиции наблюдаются два потока вдоль восточного берега с циклонической циркуляцией у устричных банок. Во время отлива течения направлены к бухте Рейд Паллада, с антициклоническими циркуляциями в бухтах Экспедиции и Новгородской. Максимальные скорости течений в среднем и придонном слоях составляют 0.02–0.05 м/с, а при ветре 5 м/с могут достигать 0.06–0.08 м/с. Ветровое волнение в бухте Экспедиции формируется под влиянием ветра и рельефа дна. Максимальные высоты волн при ветре 5 м/с составляют 0.35–0.40 м. При скорости 15 м/с высота волн достигает 0.8–0.9 м. В бухте Новгородская максимальная высота волн при скорости ветра 5 м/с составляет 0.25 м.

Отрыв частиц грунта и транспорт взвеси может осуществляться только при совместном воздействии течений и вызванных штормовыми ветрами волн. Максимальное количество взвеси формируется в подветренных районах при штормовых ветрах (15 м/с) ветрах западного направления, обеспечивающего максимальных разгон волн. В течение первого часа развития ветрового волнения в прибрежной части концентрации могут достигать значений 300 – 400 кг/м³. После завершения ветрового воздействия полное осаждение взвеси по всей акватории бухт Экспедиции и Новгородской до состояния прозрачной воды происходит в течении 10 суток с характером снижения 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 [8].

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. Поскольку корни zostеры обычно располагаются в грунте до глубины 0.2 – 0.3 м, в некоторых областях литорали могут создаваться неблагоприятные условия – корни размыты и трава вырвана волновым воздействием. В тоже 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 zostеры способны выжить, а молодые побеги и семена могут быть занесены илом и погибнуть. Зоны постоянной аккумуляции материала можно интерпретировать как неблагоприятные для условий произрастания zostеры (рис. 2).

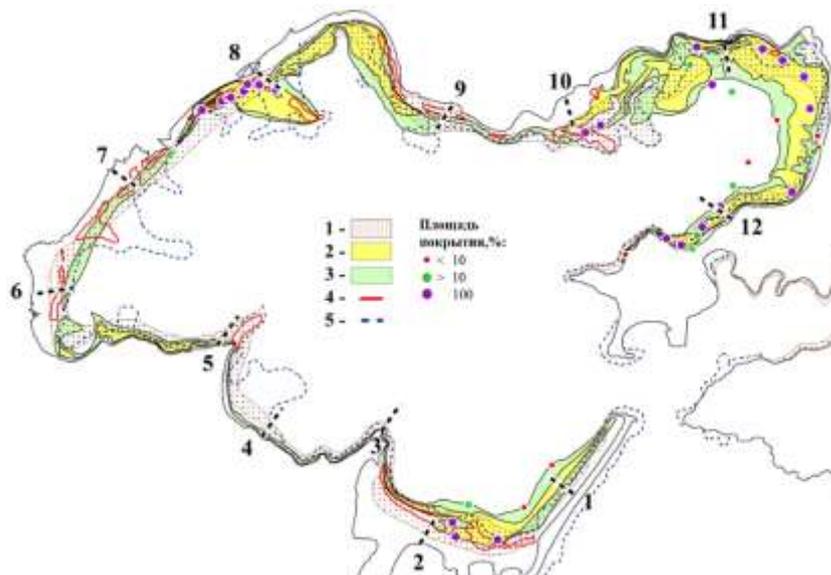


Рис. 2. Зоны произрастания zostеры во внутренних бухтах зал. Посыет по данным: 1) работы [4]; дешифрирования ДДЗ – 2) плотные и 3) разряженные заросли; полевого обследования (степень покрытия дна водорослями к общей площади обзора камеры): единичные (<10%); разряженные (>10%) и плотные (до 100%). Контрольные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

По результатам всех численных экспериментов, расчетные горизонтальные скорости течений находятся в пределах оптимальных для произрастания морских трав, в том числе zostеры [12]. Они и не могут существенно повлиять на стебли растений, а также вызвать размыв грунта и обнажение корней. По данным [14] в прибрежной зоне на глубинах до 10 м ограниченность или отсутствие освещенности за дневной период приводит к гибели zostеры приблизительно на 30-е сутки. Поскольку повторяемость штормовых ветров в теплый период года соответствует частоте раз в 10 дней [6], можно заключить, что световой режим также не является лимитирующим фактором выживания zostеры в исследуемых бухтах.

Для объяснения положения границ распространения zostеры, на основе полученных данных, были построены пространственные распределения минимальных и максимальных отметок дна. Минимальные отметки дна верхней сублиторали, на которых отсутствует слой ила, достаточно хорошо соответствуют границам распространения zostеры по данным работы [4] и дешифрированию ДДЗ. Эти границы можно интерпретировать как максимальные границы, в которых zostера может образовывать подводные луга (рис. 2). Выделенные в поле максимальных модельных отметок дна зоны отсутствия слоя ила следует интерпретировать как области, наиболее благоприятные для формирования зарослей zostеры, где морская трава не подвержена негативному воздействию морфодинамических процессов.

При визуальном сопоставлении, большая часть точек обследования (рис. 1), где проективное покрытие zostеры больше нуля, достаточно хорошо соответствует области полностью смытого слоя ила и орбитальных волновых скоростей $>0.3 - 0.35$ м/с. В этой зоне наблюдаются условия, при которых корни zostеры 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 zostеры прибрежным областям. Точки обследования, соответствующие категориям разряженного (>10 %) и единичного (<10 %) покрытия zostеры, расположены ближе к расчетным границам максимального распространения zostеры (рис. 2).

В кутовой части б. Экспедиции, в районе впадения р. Гладкая, 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. Следует отметить, что данные литературных источников, натурального обследования и спутниковых снимков дают несколько разные сведения о присутствии zostеры для объектов исследования. Это может быть связано с большой гетерогенностью плотности размещения zostеры даже в пределах одного сообщества, а также межгодовой изменчивостью гидрометеорологических условий. Согласно региональным данным [1], для рек юга Приморского края суточный модуль смыва почвы со склонов водосбора в период прохождения летних паводков может составлять 12 кг·с/км² (~6.6 т·сут/км²) и более. Основная масса смытого материала приносится в б. Экспедиции, под воздействием ветро-волновых течений взвешенные наносы перераспределяется по акватории, частично оседают и частично выносятся стоково-приливными течениями в бухты Новгородская и Рейд Паллада [8].

Заключение.

В данном исследовании для объяснения пространственного характера распространения zostеры выполнено моделирование перестройки рельефа дна и транспорта взвешенных наносов под действием ветровых волн и гидродинамического воздействия прилива. Показано, что динамика прибрежного рельефа дна определяется характером перемещения наносов в береговой зоне под совместным воздействием волн и течений. На основе данных о перераспределении наносов в прибрежной зоне были построены пространственные распределения минимальных и максимальных отметок дна и выделены зоны отсутствия слоя ила. Показано, что минимальные отметки дна верхней сублиторали, на которых отсутствует слой ила, достаточно хорошо соответствуют границам распространения zostеры по данным литературных источников. Выделенные в поле максимальных модельных отметок дна зоны отсутствия слоя ила являются наиболее благоприятными для формирования зарослей zostеры, поскольку в этой области морская трава не подвержена негативному воздействию морфодинамических процессов. Расхождения между расчетами и наблюдениями связаны с точностью цифровой модели рельефа в литорали, упрощениями начальных условий распределения донных отложений и однородным полем ветра, а также с гетерогенностью плотности размещения zostеры. Зона произрастания zostеры изменяется в зависимости от гидрометеорологических условий и степени развития растений.

Литература

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.
3. *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.
4. *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. *Вышковарцев Д.И., Пешеходько В.М.* Продукционный потенциал доминирующих видов водной растительности в мелководных бухтах залива Посъета (Японское море) // Биологические науки. 1987. № 11. С. 90–95.
 6. *Григорьева Н.И.* Залив Посъета: физико-географическая характеристика, климат, гидрологический режим // Современное экологическое состояние залива Петра Великого Японского моря. Владивосток: Изд. дом Дальневост. федерал. ун-та, 2012. 440 с.
 7. *Деева Р.А.* Каталог гармонических и негармонических постоянных приливов отечественных вод морей Дальнего Востока. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 249 с.
 8. *Катрасов С.В., Бугаец А. Н., Жариков В. В., Краснопеев С. М., Лебедев А. М., Майнулов В. А.* Оценка влияния абиотических факторов на распространение zostеры во внутренних бухтах залива Посъета на основе численных экспериментов по моделированию гидродинамики и транспорта наносов // Океанология. 2024. Т. 64. № 2. С. 344-353.
 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.
 10. 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.
 12. *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>
 13. *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.
 14. *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>
 15. *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.
 16. *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>
 17. *Lesser G.R., Roelvink J.A., van Kesteren 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.
 18. *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>
 19. *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>
 20. *Tremolieres M.* Plant response strategies to stress and disturbance: the case of aquatic plants // *Journal of Bioscience*. 2004. V. 29. P. 461–470.
 21. *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.
 22. *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.