——— МОРСКАЯ БИОЛОГИЯ ——

УДК 639.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЙОНОВ РАЗМЕЩЕНИЯ ПЛАНТАЦИЙ МАРИКУЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2021 г. С. В. Катрасов^{1, *}, А. Н. Бугаец^{1, 2}, В. В. Жариков¹, К. С. Ганзей¹, Л. В. Гончуков^{1, 3}, О. В. Соколов^{3, 4}, А. М. Лебедев¹, Н. Ф. Пшеничникова¹, С. М. Краснопеев¹

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

²Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия ³Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Владивосток, Россия ⁴Приморское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Владивосток, Россия

> *e-mail: sergey_katrasov@mail.ru Поступила в редакцию 19.05.2020 г. После доработки 10.07.2020 г. Принята к публикации 15.08.2020 г.

С помощью модели Delft3D Flow выполнено численное моделирование гидродинамического режима бухты Воевода (о. Русский, залив Петра Великого, Японское море). Русловой и распределенный приток с примыкающих к акватории бухты территорий смоделирован с помощью гидрологической модели SWAT. Выполнено сопоставление результатов моделирования с опубликованными рекомендациями по технологии садкового и донного культивирования устрицы (*Crassostrea gigas*) и гребешка приморского (*Mizuhopecten yessoensis*) и с результатами обследования гидробионтов на дне бухты. Для выделения границ зон выращивания гидробионтов использованы линии равной обеспеченности оптимальных условий обитания гидробионтов: для пастбищных плантаций в придонном слое, для зон садкового выращивания – в среднем слое. Зоны пастбищного выращивания ограничены изобатой 1 м, садкового – 5 м. Представлены карты выделенных районов для пастбищного и садкового разведения гидробионтов.

Ключевые слова: марикультура, моделирование, плантации, размещение, Crassostrea gigas, Mizuhopecten yessoensis

DOI: 10.31857/S0030157421030060

введение

Развитие аквакультуры — одно из наиболее перспективных направлений хозяйственной деятельности в прибрежной зоне морей. При этом во всем мире главными проблемами устойчивого развития марикультуры признаются взаимодействие плантаций с окружающей средой и поиски компромисса между экологической безопасностью и экономической выгодой этого способа природопользования [41].

Несмотря на достаточно длительную историю внедрения марикультуры на юге Дальневосточного региона России, уровень ее развития ни по объемам производства, ни по площади хозяйств пока не сопоставим с такими признанными центрами этого вида деятельности, как Китай, Япония и Южная Корея. В связи с этим актуальной задачей как при планировании новых, так и при оптимизации существующих марикультурных хозяйств является достижение максимального количества товарной продукции без ущерба для окружающей среды. Для ее решения необходимо районирование прибережья на основе данных гидрологических и гидробиологических исследований, позволяющее учесть наиболее вероятные факторы риска, связанные с экстремальным воздействием гидрометеорологических условий, таких как выпадение сильных осадков при прохождении тайфунов, приводящих к резкому распреснению вод и залповым выносам терригенного материала [1].

Успех марикультуры в значительной степени определяется аргументированным выбором места для организации плантаций. Морская акватория, на которой планируется размещение марикультурного хозяйства, по физико-химическим и биологическим параметрам должна оптимально удовлетворять физиологическим и экологическим потребностям выращиваемых гидробионтов. На Дальнем Востоке России эти аспекты размещения и функционирования плантаций, как и проблемы, связанные с продуктивностью объектов марикультуры в зависимости от гидрологических факторов среды, остаются недостаточно изученными [8].

Редкая, даже в наиболее освоенном районе тихоокеанского побережья России – заливе Петра Великого, сеть наблюдений за гидрологическими характеристиками вод в прибрежных бухтах осложняет выбор акваторий, потенциально пригодных для размещения плантаций марикультуры и оценку успешности выращивания объектов культивирования [9]. Имеющиеся данные не дают полного представления о сезонной и межгодовой пространственно-временной изменчивости гидродинамического режима и гидрологических характеристик. Так, для многочисленных малых рек, впадающих в бухты залива Петра Великого, измерения стока производятся только на отдельных гидрологических постах Росгидромета. Приток пресной воды к акваториям бухт, особенно в период прохождения экстремальных осадков, оценивается весьма приближенно по данным измерений, выполненных на так называемых рекаханалогах (метод гидрологической аналогии). Распределенный приток пресных вод не учитывается.

В результате фрагментарность и недостаточная репрезентативность гидрологических наблюдений не обеспечивает точности оценки речного и распределенного притока пресных вод к акваториям, необходимой для анализа пространственно-временной изменчивости гидрологических характеристик непосредственно в районах размещения марикультурных плантаций. Эти проблемы в значительной степени могут быть решены методами численного моделирования. В настоящее время в мировой практике накоплен успешный опыт применения данных глобальных и региональных моделей, разработаны разнообразные комплексные критерии, учитывающие географические, гидрологические, экологические, экономические и другие факторы при обосновании размещения и устойчивого функционирования мореферм, в том числе в условиях недостатка или отсутствия данных наблюдений [30, 35, 38, 39]. Задача реализации подобных технологий для развития и повышения эффективности марикультуры Дальневосточного региона представляется чрезвычайно перспективной [9].

В данном исследовании для определения мест размещения донных и садковых плантаций моллюсков в бухте Воевода было проведено численное моделирование динамики гидрологических параметров бухты средствами открытого программного комплекса Delft3D-Flow (https://www.deltares.nl/en/) [33]. Приток пресной воды к акватории бухты рассчитан с помощью гидрологической модели с открытым программным кодом SWAT (https:// swat.tamu.edu/) [28]. Установлены значения и обеспеченность солености и горизонтальной скорости течения для условий обитания гидробионтов. На основе этих данных определены районы оптимального по моделируемым параметрам размещения садковых и донных плантаций.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Среди приостровных акваторий залива Петра Великого бухта Воевода считается одним из наиболее перспективных районов для марикультурной деятельности [2, 4]. Она расположена на западном побережье о. Русский (рис. 1), имеет площадь около 4 км² и включает в себя две бухты второго порядка — Круглую (1.6 км²) и Мелководную (2.4 км²).

Климат в районе исследований умеренный муссонный, зимой преобладают северные ветра, обуславливающие холодную, ясную погоду. В теплый период года преобладают южные ветра с Тихого океана. Для первой половины лета характерны длительные обложные дожди небольшой интенсивности. Тайфуны, проходящие в августе сентябре, приводят к резкому подъему уровня воды в реках, их разливу в нижнем течении и сильному распреснению в прибрежных акваториях залива Петра Великого [7].

За период моделирования (1989-2019) по данным метеостанции "Владивосток" (31960) безморозный период длится в среднем 190 дней, среднегодовое количество осадков составляет 848 мм. Максимальное суточное количество осадков -243.5 мм (13.07.1990). Среднемесячная относительная влажность воздуха изменяется от 58% (в феврале) и до 91% (в июле). Минимальная, максимальная и средняя температура воздуха составляют -25.2 (25.01.1990), 32.8 (06.07.2017) и 5.0°С соответственно. Преобладающим направлением ветра является северное (37%). Средняя скорость ветра — 5.8 м/с, максимальная — 36.0 м/с(20.04.2005). Минимальное и максимальное сезонные значения солености в бухте Воевода по данным [2] составляют 32.6 (июнь-август)-34.43 PSU (декабрь-февраль).

Водосбор бухты составляет 23.59 км² (17.18 км² – р. Русская), покрыт густым широколиственным лесом, почвенный покров представлен буроземами [15]. Их гидрологический режим характеризуется свободным внутрипочвенным дренажем, что обусловлено легкосуглинистым механическим составом поверхностных горизонтов и повышенной скелетностью (до 80% от объема почвенной мас-



Рис. 1. Карта-схема района исследований: бухта Воевода; водосбор бухты, включающий р. Русскую; модельная водораздельная и русловая сеть SWAT.

сы) нижней части профиля. Наблюдения за стоком р. Русской ранее не велись, в литературных источниках лишь приводятся данные отдельных оценок [2]. В октябре 2019 г. измеренный специалистами ТИГ ДВО РАН расход воды в реке составил 0.035 м³/с. Максимальный расход, оцененный по уровню меток высоких вод, может достигать величины 14 м³/с, модуль стока – 800 л/(с км²).

Берега, прилегающие к входным мысам бухты Воевода, возвышенные и приглубые, берега внутренней части бухты низкие, песчаные и отмелые [20]. В геоморфологическом выражении бухта представляет собой седиментационную форму со слабовогнутым днищем и относится к фациальному типу малых заливов-ловушек, для которого характерен преимущественно алеврито-пелитовый состав осадков [19].

Средняя величина прилива составляет 0.2 м с максимальной амплитудой 0.43 м [14]. Стационарные гидрологические наблюдения в бухте не велись. Сезонные гидролого-гидрохимические исследования проводились ТОИ ДВО РАН в 2011—2012 гг., в ходе которых установлено, что водообмен в бухтах Воевода и Мелководная определяется циклонической циркуляцией течений [2]. Имеющиеся в литературе данные по распределению гидробионтов и условиям их обитания в бухте Воевода малочисленны [21]. В настоящее время в бухте Воевода на марикультурных хозяйствах культивируют приморского гребешка *M. yessoensis* и тихоокеанскую мидию *Mytilus trossulus* [10].

Гребешок приморский относится к стеногалинным видам и, соответственно, неспособен переносить значительные изменения солености [24, 25]. Пригодными для культивирования гребешка считаются прибрежные акватории с соленостью не ниже 28 PSU (оптимальная – 30–34 PSU). При низких значениях солености резко уменьшаются зоны распространения и размеры моллюсков. Гребешок практически не встречается в местах, где соленость опускается ниже 29 PSU [23]. C. gigas более эвригалинный вид, сравнительно хорошо переносящий распреснение и выдерживающий краткосрочное понижение солености до 5 PSU. Минимальная соленость, при которой устрица может существовать, - не ниже 12 PSU [40]. Верхняя граница оптимального диапазона солености находится в интервале 23-28 PSU [18, 29]. Поскольку основной способ питания двустворчатых моллюсков – фильтрация, среди важных абиотических условий выращивания марикультуры указывается наличие незначительных скоростей течений (0.02-0.05 м/с) [18, 28].

Подводные ландшафтные исследования в бухте Мелководная проведены в апреле 2019 г. Батиметрическая съемка выполнена с использованием картплоттера "Garmin 520s" с 12-канальным GPS-приемником и эхолотом. Координаты точек промера определялись в геодезической системе WGS-84. Расположение треков эхолотных промеров приведено на рис. 2. Подводные профили, выполненные в легководолазном снаряжении. включали описания основных характеристик ландшафтов (рельеф, грунты, флора и фауна) и сопровождались фото- и видеосъемкой компактной камерой іМАХ САМ Н8. Точечное обследование дна осуществлялось кабельной видеокамерой BestWill Cr110-7A. На каждом разрезе и во всех точках опробования фиксировались встре-



Рис. 2. Рельеф дна бухты Воевода: *1* — треки эхолотных промеров; *2* — водолазные разрезы; *3* — точки погружения камеры.

ченные виды бентоса и тип донных грунтов (ил, песок, коренные выходы, валуны и т.д.). Преобладающая фракция определялась визуально, ее размер оценивался по гранулометрической шкале. Всего проведено 25 водолазных разрезов и 46 точечных погружений кабельной видеокамеры. Их расположение показано на рис. 2.

Проведенные исследования показали, что рельеф большей части бухты Мелководной очень пологий, без резких перепадов. Дно подразделяется на участки подводных равнин и прибрежных береговых склонов с более широкой амплитудой рельефа. На участках с контрастными формами рельефа дна, прилегающих к линии берега, отдельные фации располагаются в виде узких полос. На входе в бухту по берегам находятся небольшие по площади прибрежные участки валунно-глыбовых развалов с хорошо выраженными склонами; грунт — разной степени окатанности, встречаются некрупные глыбы размером 0.5–0.7 м. Равнины сложены главным образом пелитами и алевритовыми миктитами.

Плотность поселений приморского гребешка рассчитывалась по отношению количества особей, встреченных на разрезе или в точке погружения камеры, к обследованной площади и выражалась в экз/м². Для оценки распределения устрицы в районах распространения устричников, где пересчитать особей было невозможно, использовалась площадь проективного покрытия дна друзами (в процентах/м²). Приморский гребешок был встречен на илисто-песчаном грунте на 6 разрезах из 24 в диапазоне глубин 4.2—6.7 м. Плотность поселений низкая — 0.01-0.05 экз/м², лишь у южного берега бухты на глубине 6 м в пределах небольшого участка дна на заиленном песке зафиксировано небольшое, относительное плотное, скопление с плотностью в его центральной части около 0.1 экз/м².

Устрицы единично или мелкими друзами встречаются на большей части акватории бухты. Сравнительно плотное, хорошо оконтуренное поселение этих моллюсков – устричник площадью 5.8 га обнаружен в северо-восточном районе бухты Мелководной на глубинах от 0.5 до 2 м. Максимальная плотность животных в пределах этого скопления достигает 40-50% проективного покрытия, однако большая его часть имеет значительно меньшую плотность – около 10-20%, еще более сокращаясь по направлению к его краям. Поскольку бухта является одним из центров рекреации на о. Русский, низкая плотность поселений гидробионтов в бухте очевидно связана с сильным воздействием бесконтрольного любительского лова.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА БУХТЫ ВОЕВОДА

Для моделирования динамики гидрологических параметров в бухте использовано две модели: 1) гидрологическая – модель формирования стока на водосборе бухты; 2) гидродинамическая модель динамики гидрологических параметров бухты. Данные о суточном притоке пресной воды, вычисленные с помощью гидрологической модели, используются в качестве боковых граничных условий. Моделирование выполнено непрерывно за период 01.01.1988-01.01.2019 гг. Для обеспечения согласования численного решения в пределах расчетной области и изменяющихся во времени граничных условий, для выхода модели на устойчивый режим и минимизации влияния задания начальных условий на результаты моделирования, расчеты за первый год были исключены из анализа. Метеорологическое воздействие на поверхность водосбора и бухты задано на основе архивных данных гидрометеорологических наблюдений [33] на метеостанции Владивосток-Гора с учетом требований к входным данным и временного разрешения каждой из моделей.

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) – гидрологическая модель с непрерывным временным циклом, может быть охарактеризована как физическая, описывает основные процессы гидрологического цикла суши: инфильтрацию, испарение, термический и водный режим почвы, образование и таяние снежного покрова, формирование поверхностного, внутрипочвенного и грунтового стока [31]. В основе пространственной структуры модели лежит естественная конфигурация гидрографической сети, морфометрические и ландшафтные характеристики бассейна. Модель разделяет речной бассейн на сеть частных водосборов (subbasins), внутри которых дополнительно выделяются гидрологические расчетные единицы (Hydrologic Response Unit, HRU), характеризующиеся внутренней однородностью почвенного покрова, элементов рельефа, типа землепользования и растительного покрова. В качестве входной информации модель использует только данные метеорологических наблюдений: количество атмосферных осадков, суточные данные об относительной влажности и температуре (максимальной и минимальной) воздуха, скорости ветра, солнечной радиации.

В работе использован исходный код модели SWAT 2012 v.637. Подготовка моделирования выполнена с помощью ГИС-интерфейса ArcSWAT с использованием цифровой модели рельефа SRTM30, ландшафтной карты острова [11], включающей информацию о типах почв и растительности. База данных гидрологических свойств почв сформирована по данным литературных источников [15]. Речной бассейн, согласно представлениям о естественных характеристиках склонов и водотоков (длинах и уклонах) [12], разделен на частные водосборы размером ~1–2 км². Расчет потенциального испарения выполнен методом Пенмана–Монтейса, русловой трансформации — методом кинематической волны. Параметры модели были заданы по принципу ландшафтного сходства на основе ранее полученных результатов исследований гидрологического цикла малых водосборов на юге Приморья [6, 32, 34, 37].

Расчеты выполнены непрерывно с суточным шагом по времени. Рассчитанный гидрограф притока за 1990 г. в замыкающем створе р. Русской представлен на рис. 3. Значение смоделированного стока р. Русской в межень составляет 0.02-0.03 м³/с, что соответствует измеренному значению меженного стока и данным о гидрологическом режиме малых рек Приморья [13]. Расчетный максимум суточного расхода воды составил 14.4 м³/с, что соответствует модулю стока 838 л/(с км²). Полученное значения модуля паволочного стока согласуются с ланными специальных воднобалансовых измерений на бывшей Приморской воднобалансовой станции (800-1000 $\pi/c \text{ км}^2$) [13]. Незначительное весеннее половодье, резкие пики расходов во время прохождения максимальных паводков соответствуют гидрологическим особенностям формирования стока малых рек дальневосточного типа.

<u>Delft3D Flow</u> – трехмерная модель гидродинамических процессов [36], разработана нидерландским исследовательским институтом Deltares, имеет открытый исходный код, широко применяется в мире для решения различных гидролого-экологических задач. Расчет параметров течений выполняется на основе численного решения уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска. Для уравнения скорости вертикального движения принимается гидростатическое приближение. Вертикальная компонента вектора скорости течений рассчитывается через уравнение неразрывности. Конечно-разностная аппроксимация уравнений модели выполняется на криволинейной расчетной сетке типа "С" по классификации Аракавы: скалярные величины задаются в центрах элементарных расчетных ячеек. а нормальные компоненты скорости – на их соответствующих гранях. При применении явных методов численного решения уравнений модели временной шаг решения уравнений ограничивается критерием Куранта-Фридрихса-Леви.

В качестве основы для построения цифровой модели рельефа дна бухты Воевода использованы данные навигационной карты (М 1: 5000, номер 66068). В бухте Мелководная дополнительно использованы данные эхолотных промеров. Средствами программного комплекса Delft3d (RGFGRID) для акватории бухты была сгенерирована прямолинейная расчетная сетка разрешением 20 м (101 \times 73 расчетных ячеек). Вертикальное разрешение сетки составляет 3 σ -слоя, границы которых установлены в 10% от поверхности и



Рис. 3. Измеренные осадки (метеостанция Владивосток) и расчетный гидрограф стока р. Русской за 1990 г. (включает паводок, образованный максимумом суточных осадков по метеостанции Владивосток за период наблюдений).

от дна. Сетка описывает основные особенности геоморфологического строения бухты, конфигурацию побережья и имеет достаточное разрешение для отображения характерных особенностей рельефа дна в бухте Воевода.

На открытой границе на входе в бухту Воевода заданы параметры гармонических постоянных прилива по данным поста Владивосток (табл. 1) [14, 26]. В табл. 1 используются следующие обозначения волн: М2 – 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; О1 – большая лунная эллиптическая суточная. Коэффициент шероховатости дна в бухте Мелководная задан в соответствии с данными обследования (50-65 м^{0.5}/с), в остальной части бухты Воевода (30-50 м^{0.5}/с) в соответствии с данными навигационной карты и описанием, приведенным в [3]. Соленость на открытой границе задана по материалам [2] как постоянные по глубине сезонные климатические значения (декабрь-февраль 34.43 PSU; март-май 33.0 PSU; июнь-август 32.6 PSU; сентябрь-ноябрь 32.82 PSU). Соленость речных вод и вод распределенного стока задана равной 0.1 PSU.

Таблица 1. Гармонические постоянные приливов п. Владивосток (*H* – амплитуда, *g* – фаза)

Параметр	M2	S 2	N2	K2	K1	01	P1	Q1
<i>Н</i> , м	0.075	0.034	0.021	0.01	0.055	0.05	0.016	0.01
g°	89	120	63	111	356	324	348	277

Скорость и направление ветра на весь расчетный период заданы с дискретностью 3 ч. Относительная влажность воздуха, балл облачности, температура воздуха, атмосферные осадки, выпадаюшие непосредственно на акваторию бухты Воевода заданы с суточным разрешением. Данные о боковом притоке пресных вод заданы для каждой ячейки расчетной сетки, примыкающей к береговой линии в виде суточного гидрографа притока (m^{3}/c) на основе результатов модели SWAT. Оригинальная программа использована для создания файлов бокового притока в формате Delft3D из выводных файлов модели SWAT. В местах впадения модельных водотоков SWAT задан суточный гидрограф стока в замыкающих створах этих водотоков. Для задания распределенного притока к акватории бухты сток с каждого расчетного элемента гидрологической модели SWAT, непосредственно примыкающего к акватории бухты, был равномерно распределен между ячейками расчетной сетки модели Delft3D, примыкающих к данному расчетному элементу SWAT. Расчеты выполнены с шагом по времени 15 с, результаты моделирования выводились с дискретностью 6 ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе анализа результатов гидродинамического моделирования, бухта Воевода может быть условно разделена на две части. В мористой и средней части бухты (за исключением бухт второго порядка) осуществляется свободный обмен с водами Амурского залива. В бухтах Мелководная и Круглая под влиянием прилива и рельефа дна формируется циклоническая циркуляция. Режим солености определяется водным балансом, кото-



Рис. 4. Пространственное распределение солености при прохождении катастрофического паводка 1990 г. по данным модельных расчетов: а) 13.07 12:00 и б) 14.07 06:00 в поверхностном (*1*), среднем (*2*) и придонном (*3*) σ-слое модели Delft3D.

рый зависит от притока вод открытого моря (Амурского залива), внутреннего водообмена в бухте, притока пресных вод с ее водосбора, осадков, выпадающих непосредственно на акваторию бухты. Во время сильных дождей, связанных с активной циклонической деятельностью и выходом тропических тайфунов, граница влияния стока р. Русская со значениями солености 20–24 PSU в среднем и придонном слое достигает входа в бухту Круглую и распространяется вплоть до центральной части бухты Воевода (рис. 4). В районе впадения р. Русская соленость в бухте Мелководная может снижаться практически до полного распреснения.

Для целей данного исследования результаты моделирования для каждой ячейки расчетной сетки и каждого расчетного **σ**-слоя были представлены в виде временны́х рядов солености и горизонтальных компонент скорости течения. Для построения эмпирических кривых обеспеченности были использованы данные только за теплый период (апрель—октябрь). Данный подход позволяет для каждого расчетного слоя модели получить как пространственное распределение обеспеченных значений гидрологических характеристик, так и пространственное распределение обеспеченности для конкретно заданного значения солености или горизонтальной скорости.

Результаты обследования подводных ландшафтов и выводы о распределении *M. yessoensis* и *C. gigas* в бухте Мелководная были сопоставлены с пространственным распределением обеспеченности модельных значений скоростей и солености, входящих в диапазон благоприятных условий, указанных в литературных источниках и инструкциях по культивированию данных видов [5, 16–18, 22–29]. Для выделения зон выращивания подбирались линии равной обеспеченности, ограничивающие 100% случаев обнаружения гидробионтов.

В качестве пределов распространения в бухте оптимальных по халинным характеристикам условий выращивания для гребешка была принята минимальная граница – 85% обеспеченности для солености 30 PSU и максимальная, равная морской солености; для устрицы – границы 80% обеспеченности солености 28 PSU и 95% обеспеченности солености 30 PSU соответственно. Пределы распространения условий, оптимальных по скоростям течений, определены с учетом результатов водолазного обследования бухты, показавшего что, поселения M. yessoensis сконцентрированы в области, ограниченной линией 95% обеспеченности скорости течения в придонном слое 0.03 м/с. Районы расположения устричников в зоне 95% обеспеченности скорости 0.02 м/с.

Линии равной обеспеченности указанных выше значений в среднем и придонном модельном слое были использованы для выделения зон садкового выращивания и границ пастбищных плантаций этих гидробионтов соответственно (рис. 5). Зоны пастбищного выращивания ограничены изобатой – 1 м, садкового – 5 м.

Таким образом, границы выделенных зон можно интерпретировать как вероятность не превышения (или не занижения) оптимальных значений. Например, установленная по данным наблюдений оптимальная граница для разведения гребешка в 85 случаях из 100 обеспечивает не снижение уровня солености ниже 30 PSU. Указанная



Рис. 5. Выделенные участки по критериям солености и скоростей течений для размещения: а) донных и б) садковых плантаций в акватории бухты Воевода для: гребешка (1) и устрицы (2). Изолинии 75% обеспеченности солености (3) и скоростей течений (4).

на рис. 5а предельная для выращивания устрицы граница акватории бухты в 95 случаях из 100 обеспечивает не превышение солености выше 30 PSU. Выбранные критерии не исключают кратковременного воздействия неблагоприятных факторов, при которых могут происходить определенные потери качества или объемов продукции. Для дополнительной оценки условий выживаемости и культивирования гидробионтов и рисков потери продукции по условиям солености и течений на выделенные зоны были нанесены изолинии соответствующих характеристик 75% обеспеченности в придонном и среднем слое.

Наиболее благоприятными местами для роста и выращивания гребешка являются центральная и более открытая часть бухты Воевода. Гидрологические условия бухт Мелководная и Круглая больше подходят для пастбищного выращивания устрицы. По моделированным параметрам для донного выращивания гребешка пригодно 2.72 км² (68% акватории), для садкового выращивания – 1.85 км² (46%). Площадь участков, оптимальных по параметрам солености и скоростей течений для донного выращивания устрицы тихоокеанской, составляет 1.93 км² (48%) и 1.04 км² (26%) для донного и садкового выращивания соответственно (рис. 5).

Представленные картосхемы могут быть использованы при принятии решения о размещении садковых и донных плантаций с точки зрения оптимальных режимов солености и скоростей течений. Изолинии обеспеченностей могут быть использованы для вероятностной оценки повторяемости неблагоприятных событий. при которых будут превышены допустимые критерии выживаемости для гидробионтов, и определения оптимальных участков размещения, гарантирующих эффективную эксплуатацию мариферм при допустимых для производителя рисках. В пределах этой зоны марикультурная деятельность сохраняет свою экономическую целесообразность, то есть потери в результате ситуаций резкого изменения рассматриваемых параметров не повлекут катастрофических последствий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе с помощью модели Delft3D Flow выполнено численное моделирование гидродинамического режима бухты Воевода. Получены пространственные распределения обеспеченных значений скорости течения и солености. На основе этих данных были выделены районы с благоприятными условиями для пастбищного и садкового разведения гребешка приморского (Mizuhopecten yessoensis) и устрицы гигантской (Crassostrea gigas). При определении границ районов использованы линии равной обеспеченности значений указанных характеристик, соответствующих диапазону рекомендованных значений для культивирования данных видов и результатам обследования распределения гидробионтов на дне бухты. Представлены карты выделенных районов для пастбищного и садкового разведения гидробионтов.

Показано, что данные моделирования являются перспективными для обеспечения устойчивого развития марикультуры. Разработанные технологии могут быть использованы для других подобных объектов, стать методической основой создания оперативной технологии прогноза гидрологических характеристик на основе данных глобальных или региональных моделей атмосферы и океана. При условии развития наблюдательной сети в анализ могут быть включены данные для других абиотических и биотических факто-

ОКЕАНОЛОГИЯ том 61 № 3 2021

ров, моделирование динамики которых сможет обеспечить расчеты приемной емкости акваторий и потенциальной продуктивности плантаций при планировании развития марикультуры. Интеграция гидро-экологической и гидродинамической моделей обеспечивает широкие возможности для разработки основ экологического управления прибрежными акваториями и территориями.

Благодарности. Авторы выражают отдельную благодарность глав. спец. ДВНИГМИ Г.Ю. Харитоновой за предоставленные данные о характеристиках приливного режима района исследования.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке РНФ (грант 17-77-30006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Акулин В.Н., Дзизюров В.Д., Поздняков С.Е.* Аквакультура на Дальнем Востоке: вчера, сегодня, завтра // Труды ВНИРО. 2015. Т. 153. С. 121–136.
- Барабанщиков Ю.А., Тищенко П.Я., Семкин П.Ю., Волкова Т.И., Звалинский В.И., Михайлик Т.А., Сагалаев С.Г., Сергеев А.Ф., Тищенко П.П., Швецова М.Г., Шкирникова Е.М. Сезонные гидролого-гидрохимические исследования бухты Воевода (Амурский залив, Японское море) // Изв. ТИНРО. 2015. Т. 180. С. 161–178.

https://doi.org/10.26428/1606-9919-2015-180-161-178

 Барабанщиков Ю.А., Тищенко П.Я., Семкин П.Ю., Михайлик Т.А., Косьяненко А.А. Условия образования лечебных грязей в бухте Воевода (Амурский залив, Японское море) // Изв. ТИНРО. 2018. Т. 192. С. 167–176.

https://doi.org/10.26428/1606-9919-2018-192-167-176

- 4. Баранов А.Ю., Викторовская Г.И., Дзизюров В.Д. Перспективы культивирования тихоокеанской устрицы Crassostreagigas в Дальневосточном регионе // Морские биологические исследования: достижения и перспективы: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с межд. участием, приуроч. к 145-летию Севастоп. биол. станции (19–24 сентября 2016, Севастополь), в 3-х томах. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. Т. 3. С. 342–345.
- 5. Брыков В.А., Колотухина Н.К. Биологические основы культивирования приморского гребешка в прибрежных водах Приморского края // Вопросы рыболовства, 2009. Т. 11. № 3 (43). С. 564–586.
- Бугаец А.Н., Гарцман Б.И., Терешкина А.А., Гончуков Л.В., Бугаец Н.Д., Сидоренко Н.Ю., Пшеничникова Н.Ф., Краснопеев С.М. Опыт применения модели SWAT для изучения гидрологического режима малого речного бассейна (река Комаровка, Приморский край) // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 68–79.
- Будаева В.Д., Зуенко Ю.И., Макаров В.Г. Структура и динамика вод залива Петра Великого в условиях сильного летнего распреснения (2008–2009 гг.) // Тр. ДВНИГМИ. 2010. Юбил. вып. С. 158–172.

- Гаврилова Г.С. Приемная емкость аквакультурной зоны залива Петра Великого (Японское море): Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Владивосток: ТИНРО-Центр. 2012. 37 с.
- Гаврилова Г.С., Ким Л.Н. Эффективность культивирования приморского гребешка (Mizuhopecten yessoensis) в Уссурийском заливе (Японское море) // Изв. ТИНРО. 2016. Т. 185. С. 240–250. https://doi.org/10.26428/1606-9919-2016-185-240-250
- Гаврилова Г.С. Продуктивность плантаций двустворчатых моллюсков в Приморье [Электронный ресурс]: [монография] / А.В. Кучерявенко, Тихоокеан. науч.-исслед. рыбохоз. центр (ТИНРОцентр), Г.С. Гаврилова. Владивосток: ТИНРО-Центр, 2011. 113 с. Библиогр.: с. 101–111. ISBN 978-5-89131-099-5. Режим доступа: https://rucont.ru/efd/ 278345
- Ганзей К.С., Киселёва А.Г., Пшеничникова Н.Ф. Ландшафты острова русский. Карта. Масштаб 1: 25000. Владивосток: Колорит. Владивосток, 2016.
- Гарцман Б.И., Бугаец А.Н., Тегай Н.Д., Краснопеев С.М. Анализ структуры речных систем и перспективы моделирования гидрологических процессов // География и природные ресурсы. 2008. № 2. С. 20–29.
- 13. Горчаков А.М. Исследование элементов водного баланса и его структуры в Приморье. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 180 с.
- Деева Р.А. Каталог гармонических и негармонических постоянных приливов отечественных вод морей Дальнего Востока. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 249 с.
- 15. *Иванов Г.И.* Почвообразование на юге Дальнего Востока. М.: Наука, 1976. 200 с.
- 16. Инструкция по технологии культивирования тихоокеанской устрицы / сост. Кучерявенко А.В., Жук А.П.; Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр. Владивосток: ТИНРО-Центр, 2011. 27 с.
- 17. Инструкция по технологии садкового и донного культивирования приморского гребешка / сост. Кучерявенко А.В., Жук А.П.; Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр. Владивосток: ТИНРО-Центр, 2011. 49 с.
- Карпевич А.Ф. Потенциальные свойства гидробионтов и их реализация в аквакультуре / Биологические основы марикультуры. М.: ВНИРО, 1998. С. 78–100.
- Лихт Ф.Р., Астахов А.С., Боцул А.И. и др. Структура осадков и фации Японского моря: моногр. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. 287 с.
- Лоция северо-западного берега Японского моря от реки Туманная до мыса Белкина. ГУНО. 1984. 316 с.
- Ляшенко С.А. Особенности воспроизводства тихоокеанской мидии в бухте Воевода (остров Русский) // Изв. ТИНРО. 2005. Т. 140. С. 352–365.

- Моисеев П.А., Карпевич, А.Ф., Романычева О.Д. и др. Морская аквакультура. М.: Агропромиздат, 1985. 253 с.
- Силина А.В., Брегман Ю.Э. Численность и биомасса // Приморский гребешок. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1986. С. 190–200.
- Силина А.В. Распространение и местообитание // Приморский гребешок. Владивосток: ДВНЦ АН СССР. 1986, С. 14–19.
- Силина А.В., Позднякова Л.А. Рост // Приморский гребешок. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1986. С. 144–164.
- Супранович Т.И., Якунин Л.П. Гидрология залива Петра Великого // Труды ДВНИГМИ. 1976. Вып. 22. С. 104–105.
- 27. Супрунович А.В., Макаров Ю.Н. Культивируемые беспозвоночные. Пищевые беспозвоночные: мидии, устрицы, гребешки, раки, креветки. Киев: Наук. думка, 1990. 264 с.
- 28. Технологические аспекты / Технология культивирования приморского гребешка.: Портал ЕСИМО (Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане) [Электронный ресурс] // Версия 1.6.8 Разработано Центром океанографических данных ФГБУ ВНИИГМИ-МЦД 1999–2020. URL:http://portal.esimo.ferhri.ru/portal/ portal/poi/japan/pacificKISWindowJapan (дата обращения: 20.04.2020)
- Яковлев Ю.М., Раков В.А., Долгов Л.В. Размножение и развитие тихоокеанской устрицы Crassostrea gigas Thunb // В кн.: Организмы обрастания дальневосточных морей. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1981. С. 79–93.
- Aguilar-Manjarrez J., Soto D., Brummet R.Aquaculture zoning, site selection and area management under the ecosystem approach to aquaculture. Full document. FAO and the World Bank. Rome: FAO, 2017. 408 p.
- Arnold J. G., Allen P.M., Bernhardt G. A comprehensive surface – groundwater flow model // J. Hydrology. 1993. V. 142. P. 47–69.
- Bugaets A.N., Gartsman B.I., Gonchukov L.V., Lupakov S.Y., Shamov V.V., Pshenichnikova N.F., Tereshkina A.A. Modeling the hydrological regime of small testbed catchments based on field observations: a case study of the Pravaya Sokolovka River, the Upper Ussuri River basin // Water Resources. 2019. V. 46. № 2. P. 8–16.
- Bugaets A.N., Gonchukov L.V., Sokolov O.V., Gartsman B.I., Krasnopeev S.M. Information system to support regional hydrological monitoring and forecasting // Water Resources. 2018. V. 45. № 1. P. 59–66.
- 34. Gonchukov L.V., Bugaets A.N., Gartsman B.I., Lee K.T. Weather radar data for hydrological modelling: an application for south of Primorye region, Russia // Water Resources. 2019. V. 46. № 2. P. 25–30.
- 35. *Kapetsky J.M., Aguilar-Manjarrez J.* Geographic information systems, remote sensing and mapping for the development and management of marine aquaculture.

442

FAO Fisheries Technical Paper No. 458. Rome: FAO, 2007. 125 p.

- Lesser G.R., Roelvink J.A. et al. Development and validation of a three-dimensional morphological model // Coastal Engineering. 2004. V. 51 (8–9). P. 883–915.
- Motovilov Yu.G., Bugaets A.N., Gartsman B.I., Gonchukov L.V., Kalugin A.S., Moreido V.M., Suchilina Z.A., Fingert E.A. Assessing the sensitivity of a model of runoff formation in the Ussuri River basin // Water Resources. 2018. V. 45. № 1. P. 128–134.
- Ross, L.G., Telfer, T.C., Falconer, L., Soto D., Aguilar-Manjarrez, J. Site selection and carrying capacities for inland and coastal aquaculture. Rome: FAO, 2013. 295 p.
- 39. Silva C., Ferreira J.G., Bricker S.B., DelValls T.A., Martin Diaz M.L., Yanez E. Site selection for shellfish Aquaculture by means of GIS and farm-scale models, with an emphasis on data-poor environments // Aquaculture. 2011. № 318. P. 444–457.
- 40. Shatkin G., Shumway S.E., Hawes R. Considerations regarding the possible introduction of the Pacific oyster (Crassostrea gigas) to the Gulf of Maine: a review of global experience // J. Shellfish Res. 1997. V. 16. № 2. P. 463–477.
- 41. The state of world fisheries and aquaculture 2006. FAO Fisheries and Aquaculture Department. Rome: FAO, 2007. 176 p.

Mariculture Site Selection Based on the Hydrodynamic Modelling Results

S. V. Katrasov^{*a*, #}, A. N. Bugaets^{*a*, *b*}, V. V. Zharikov^{*a*}, K. S. Ganzei^{*a*}, L. V. Gonchukov^{*a*, *c*}, O. V. Sokolov^{*c*, *d*}, A. M. Lebedev^{*a*}, N. F. Pshenichnikova^{*a*}, S. M. Krasnopeev^{*a*}

^a Pacific Geographical Institute, Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia
^b Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
^c Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia
^d Primorskoe Administration for hydrometeorology and environmental monitoring, Vladivostok, Russia
[#]e-mail: sergey katrasov@mail.ru

Delft3D Flow model was applied to simulation of the hydrodynamic regime of Voevoda Bay (south Primorye, Russki Island, Peter the Great Bay, Russia). The streamflow and distributed inflow from the territories adjacent to the bay is modeled using the SWAT hydrological model. A comparison of the simulation results with published recommendations on the technology of cage and bottom cultivation of oysters (*Crassostrea gigas*) and scallop (*Mizuhopecten yessoensis*) and the results of an examination of the distribution of hydrobionts at the bottom of the bay was performed. To identify the hydrobionts cultivation zones boundaries, the lines of equal probability exceedance of optimal environment conditions for bivalves were used: for pasture plantations in the bottom layer, for zones of cage cultivation – in the middle layer. Zones of pasture cultivation are limited by isobaths of 1 m, for the cage cultivation – 5 m. Areas of hydrobionts optimal cultivation were outlined.

Keywords: mariculture, site selection, modelling, Crassostrea gigas, Mizuhopecten yessoensis