

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА В ВОДАХ ЗАЛИВА АНИВА (ОХОТСКОЕ МОРЕ)

А.В. Леонов¹, В.С. Архипкин², В.М. Пищальник³, Е.М. Латковская⁴

¹ Институт океанологии имени П.П. Шишова РАН, лаборатория геохимии,
гл. научн. сотр., проф., д-р хим. наук; e-mail: leonov@ocean.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра океанологии, доц., канд. геогр. наук; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

³ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, лаборатория волновой динамики и прибрежных течений,
проф., д-р техн. наук; e-mail: vpishchallnik@rambler.ru

⁴ Сахалинский государственный университет, учебно-исследовательская лаборатория химико-биологических исследований, зав. лаб., канд. биол. наук; e-mail: elena-sazon02@yandex.ru

Для вод залива Анива с помощью CNPSi-модели воспроизведено внутригодовое изменение концентраций растворенного O_2 в пяти выделенных в заливе районах для определения рисков в размещении марикультурных ферм. Район 1 резко отличается от других районов (наиболее мелководный и распресненный), район 2 характеризует выраженный водообмен с районами 3 и 4, весной в этих районах формируются и выделяются два слоя, летом толща воды однородна; район 3 имеет свободный водообмен с открытыми водами пролива Лаперуза; район 4 – относится к глубоководной части залива, его отличительная особенность – характерное опускание вод в центре антициклонического круговорота и максимальное заглубление термоклина (до 60–70 м). Район 5 расположен вдоль западного побережья Тонино-Анивского п-ова и характеризуется наличием постоянного апвеллинга вод в безледный период, что отчетливо выражается пониженными значениями температуры воды. Расчет показал, что в районах, пригодных для размещения марикультурных ферм, прибрежные воды обеспечены кислородом в течении всего года. Анаэробные условия складываются только в самых глубоководных местах залива в весенний период. В заливе Анива дополнительным источником кислорода служат естественные заросли макрофитов, среди которых по биомассе и занимаемой площади доминирует сахарина японская (*Saccharina japonica*). Ежегодно только сахарина японская фиксирует в своей биомассе не менее 1,2 тыс. т С и поставляет не менее 3,1 тыс. т O_2 . Но, в отличие от выращенной биомассы, наличная биомасса всех макрофитов останется в системе, будет разрушаться в процессе жизненного цикла и при этом на окисление будет расходоваться кислород, а накопленный в биомассе углерод вновь вернется в быстрый круговорот, за исключением той доли, которая будет снесена в центральную глубоководную часть залива, где будет медленно разлагаться почти в анаэробных условиях. В заливе возможно дополнительно размещать водорослевые плантации, которые могут ежегодно фиксировать до 49,5 тыс. т С, при этом дополнительно выделяя до 132 тыс. т O_2 . Полученные модельные оценки могут являться точкой отсчета для определения «базовой линии» по содержанию растворенного кислорода и составления балансовых уравнений потоков газов в системе «океан – атмосфера» в заливе Анива до начала развития морских водорослевых плантаций, выполняющих попутно роль карбоновых ферм.

Ключевые слова: залив Анива, кислород, CNPSi-модель, марикультура, карбоновый полигон, баланс углерода и кислорода

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.7

ВВЕДЕНИЕ

Мировая климатическая повестка и поиск путей борьбы с изменениями климата все больше фокусируют внимание на морских экосистемах, включая прибрежные заросли макрофитов, называемые Blue Forests [Out of the blue..., 2020; Norwegian Blue..., 2022]. Помимо увеличения содержания в атмосфере CO_2 прогнозируется, что запасы растворенного кислорода в Мировом океане сократятся на 1–7% к 2100 г. [Keeling et al., 2010] из-за потепления океана, уменьшения вентиляции глубоких глубин океана и эвтрофикации прибрежных вод [Rabalais et al., 2014; Claret et al., 2018].

Текущее поглощение парниковых газов может быть существенно ускорено путем создания дополнительной биомассы макрофитов в марикультуре. По оценкам С. Duarte с соавторами, выращенные макроводоросли сейчас поглощают только около 6% от поглощения природными популяциями, однако, исходя из того что во всем мире площадь под морские плантации не более 0,04% от естественных местообитаний, потенциал морских карбоновых ферм становится очевиден [Duarte et al., 2017; 2022]. Хотя, безусловно, в развитии таких марикультурных карбоновых ферм, где наряду с традиционными методами использования выращенных

водорослей в еду будет налажена переработка углерода на долговременное хранение, есть много ограничений [Troell et al., 2022].

Залив Анива (Охотское море) является акваторией с благоприятными условиями для развития марикультуры ценных видов гидробионтов. По оценке С.И. Масленникова, площадь прибрежной акватории, пригодной для интенсивной марикультуры морских беспозвоночных, без учета открытых акваторий здесь составляет 177,4 тыс. га, а суммарная продуктивность только от марикультуры двустворчатых моллюсков может достигать 295,8 тыс. т [Maslennikov, 2008]. Урожай ламинарии японской в мировой практике культивирования может составлять 200–300 т сырой массы/га в год [Maslennikov, 2008]. В условиях Приморья урожай в двухгодичном цикле достигает 100 т/га [Понырко, Крупнова, 2021].

В заливе существуют природные популяции практически всех востребованных в марикультуре объектов. Продуктивность и успешность марикультурного хозяйства зависит от комплекса абиотических и биотических факторов окружающей среды (ледового режима, температуры, скорости и направления течений, режима биогенных элементов, местной фауны и флоры и т. д.). Для водорослевой фермы важен режим биогенных веществ, температурный, волновой режим, а для фермы, где выращивают беспозвоночных, в первую очередь необходимо хорошее обеспечение кислородом. Критическое значение содержания кислорода в воде, ниже которого возможна гибель гидробионтов, составляет 6 мг/дм³ [Приказ..., 2016]. Совместное выращивание организмов разных трофических уровней по типу интегрированной мультитрофной аквакультуры (Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA)) дает дополнительные преимущества для поглощения углерода, а также регулирования кислородного режима и биогенной нагрузки на акваторию [Mahmood et al., 2016].

Таким образом, залив Анива может стать морским карбоновым полигоном, где экспериментальным путем возможно оценить дополнительные объемы поглощения углекислого газа при интенсивной мультитрофной марикультуре (например, несколько видов водорослей и двустворчатых моллюсков) в сравнении с природным местообитанием этих видов.

В то же время берега залива – это довольно хорошо освоенная человеком зона. В самом заливе происходит интенсивная практическая реализация различных проектов, в том числе транспортировка нефти и газа крупными танкерами, дампинг грунта после строительства завода СПГ, дноуглубления портов, что создает потенциальную угрозу загряз-

нения прибрежных морских акваторий. Только при строительстве завода СПГ в Пригородном было сброшено в залив Анива более 2 млн м³ грунта [Афанасьев, 2018], что явилось одной из причин снижения численности популяции камчатского краба [Низяев, 2022].

Одновременно здесь традиционно ведется активная добыча морских биоресурсов. Здесь же в весенне-летний период нагуливается молодь тихоокеанских лососей, скатившаяся с естественных нерестилищ и выпущенная с лососевых рыбозаводных заводов, а в летне-осенний период проходят на речные нерестилища взрослые лососи. Загрязнение морской среды нарушает естественное развитие экологических процессов трансформации органических веществ (углеродный баланс), формирования биомассы фито- и зоопланктона как основы пищевой цепи (снижает интенсивность карбоновой помпы). Загрязнение морской среды существенно снижает биопотенциал секвестрации углерода, а также создает риски гибели гидробионтов в марикультурных хозяйствах и качеству их продукции.

Очевидно, что для залива Анива как акватории с высоким потенциалом развития морских марикультурных ферм актуальны проблемы мониторинга качества среды, оценки антропогенного воздействия на морскую среду и обитающих в ней гидробионтов при анализе и исследовании сохранения условий для функционирования возобновляемых морских биоресурсов.

В связи с изложенным выше чрезвычайно важно использовать методологию математического моделирования для исследования современного состояния морской среды залива Анива как модельного карбонового полигона и оценки возможности развития процессов самоочищения.

Цель статьи – исследовать изменчивость концентрации растворенного кислорода в заливе Анива как основного показателя качества среды для развития марикультуры и потоков газов по результатам современных исследований и применения гидроэкологического моделирования.

Для понимания особенностей распределения показателей состояния морской среды в заливе Анива решались следующие задачи:

- оценить возможность применения CNPSi-модели для изучения особенностей распределения растворенного кислорода в заливе Анива как базовой линии для дальнейшей оценки вклада водорослевых плантаций в газовые потоки;

- оценить пространственно-временное распределение концентраций растворенного кислорода на акватории залива Анива и возможные риски при размещении марикультурных ферм.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования динамики концентрации растворенного кислорода в водах залива Анива использовалась гидроэкологическая CNPSi-модель [Леонов, Сапожников, 1997; Леонов и др., 2012]. Эта модель описывает взаимосвязанные биогидрохимические циклы азота (N), фосфора (P) и кремния (Si), а также трансформацию растворенного органического углерода (DOC) и режим кислорода (O_2) в двуслойной водной экосистеме. CNPSi-модель может применяться для изучения условий функционирования водных экосистем, так как учитывает взаимодействие природных и антропогенных факторов и отражает их общее влияние на водную среду. CNPSi-модель рассчитывает динамику концентраций DOC, O_2 , N-, P-, Si-содержащих органических и минеральных веществ при их биотрансформации в водной среде сообществом водных микроорганизмов и при развитии процессов обмена веществ на границах вода – дно, вода – воздух, водоем – река, а также при переносе веществ водными массами через границы выделенных акваторий.

В CNPSi-модели используются следующие соединения P, N и Si в водной среде: детритные формы P, N, Si; растворенные неорганические и органические формы P, N и Si; минеральные формы N – аммонийный N, нитритный N, нитратный N; мочевины N, свободный азот (N_2) и органический углерод (C). Модель также включает компоненты соединений биогенных элементов (C, N, P) в донных отложениях и растворенные газы.

Биотрансформация соединений органогенных элементов в модели осуществляется сообществом микроорганизмов: гетеротрофные бактерии потребляют органические соединения и в процессе метаболизма образуют пул минеральных веществ; бактерии вида *Nitrosomonas* потребляют аммоний и выделяют в среду нитриты; бактерии вида *Nitrobacter* потребляют нитриты и выделяют в среду нитраты; фитопланктон, а также макрофиты утилизируют минеральные вещества и формируют запас органических веществ в водной среде; зоопланктонные организмы регулируют динамику организмов сообщества и своей активностью влияют на развитие продукционно-деструкционных процессов. В модели заложена возможность трансформации загрязняющих веществ, в частности нефтепродуктов и фенола, соответственно нефте- и фенолоокисляющими бактериями.

Входными данными для модели, помимо переносов воды между районами и между верхним и нижним слоями, служат глубина залегания термоклина, температура воды в верхнем и нижнем слоях, освещенность, фотопериод и прозрачность. Поступление биогенных веществ с речным стоком в

залив Анива учитывалось только для района 1. Бралась среднемесячные среднемноголетние данные. Моделирование проводилось для всего годового цикла с шагом по времени $\Delta t = 0,1$ сут.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Модель CNPSi относится к типу боксовых моделей и поэтому для ее применения необходимо выделить отдельные районы залива Анива и задать на их границах соответствующие переносы воды. На основе расчетов для каждого района можно вычислить временную изменчивость тех или иных параметров, рассчитываемых моделью.

Выполненные исследования [Пищальник, Бобков, 2000; Pishchal'nik, Leonov, 2003; Pishchal'nik et al., 2005] показали, что океанологические процессы в заливе Анива имеют пространственную неоднородность. При районировании залива Анива выделены районы с близкими условиями по термохалинной структуре и циркуляции вод, а также особенности годового хода температуры воды в поверхностном слое на стандартных станциях и сезонный характер пространственного распределения планктонных организмов [Брагина, 2002]. В результате для дальнейших исследований залива Анива в нем было выделено пять районов (рис. 1).

Самый мелководный и наиболее распресненный район в заливе – район 1. Здесь по всем показателям наблюдаются наиболее резкие отличия от других районов. Район 2 расположен южнее первого и характеризуется четко выраженным водообменом с соседними районами 3 и 4. Весной здесь отчетливо прослеживается термоклин и выделяются два слоя. Затем вся толща воды становится однородной. Район 3 имеет свободный водообмен с открытой частью пролива Лаперуза, что непосредственно влияет на гидролого-гидрохимический режим данной акватории. Район 4 – центральная и наиболее глубоководная часть залива Анива. Отличительная особенность его режима – характерное опускание вод в центре антициклонического круговорота и максимальное заглубление термоклина (до горизонта 60–70 м). Район 5 расположен вдоль западного побережья Тонино-Анивского п-ова. Характеризуется наличием апвеллинга вод в безледный период, что отчетливо выражается пониженными значениями температуры воды.

Анализ результатов моделирования показал, что концентрация растворенного O_2 от зимы к весне возрастает и в апреле повсеместно достигает около 14 мг O_2 /л. В конце апреля в районах 3 и 4 отмечено резкое снижение содержания O_2 в поверхностном слое (до <1 мг O_2 /л) за счет того, что в указанных районах весной резко сокращается его содержание

в придонных слоях. Однако это характерно только для наиболее глубоководных участков, где создаются почти анаэробные условия за счет слабой конвекции и где размещение марикультурных хозяйств невозможно.

Небольшие изменения отмечены и в водах района 1: в августе концентрация растворенного O_2 здесь составляет 9,2 мг O_2 /л, в сентябре после промежуточного максимума – 10,5, в октябре вновь снижается до 9,1 и к концу года возрастает до 10,1 мг O_2 /л. В районе 2 августовский минимум

O_2 (9,2 мг O_2 /л) сменяется постепенным увеличением его концентрации к концу года до 10,9 мг O_2 /л. В районах 3–5 минимум O_2 летом составляет 10,6–10,8 мг O_2 /л, к концу года его содержание здесь возрастает до 12,4–12,6 мг O_2 /л (рис. 2). Необходимо отметить, что концентрации растворенного кислорода в зимний период в районах 3 и 5, полученные в результате моделирования, не согласуются с данными наблюдений. По всей видимости, это связано с неточным заданием переносов воды на границах этих районов.

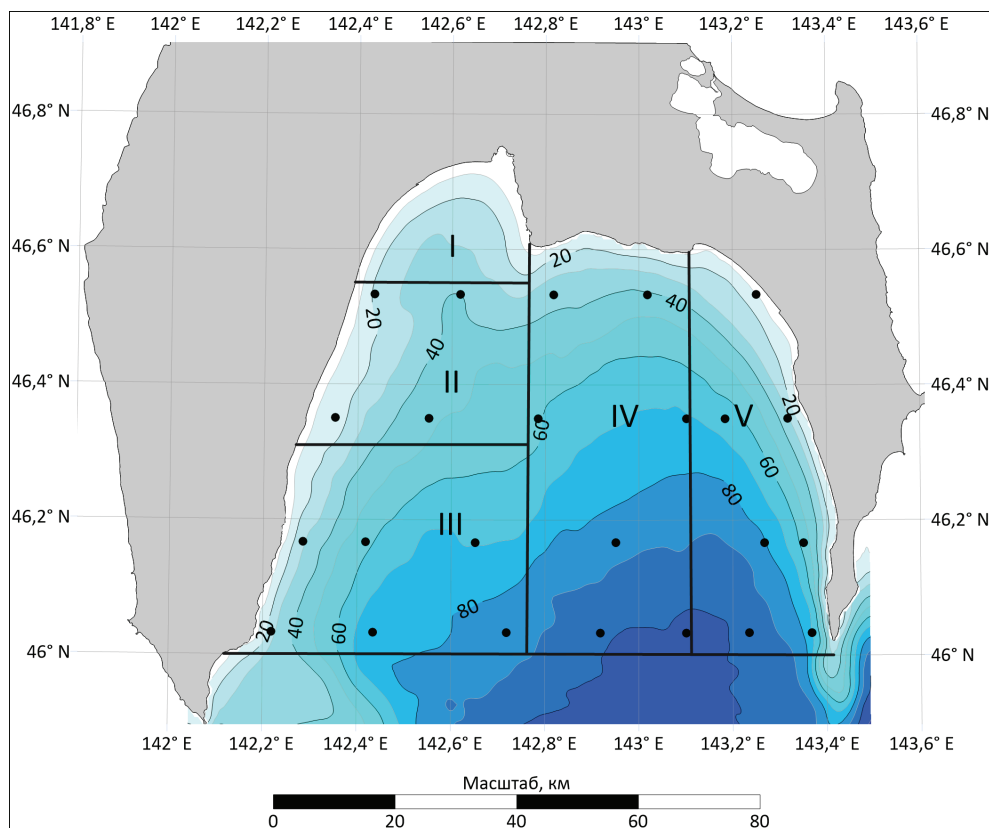


Рис. 1. Районы залива Анива, используемые в модели CNPSi. Точками показано расположение стандартных океанографических станций

Fig. 1. Patches of the Aniva Bay used in CNPSi model. The dots indicate the location of standard oceanographic stations

Таким образом, прибрежные воды всех выделенных районов залива Анива обеспечены кислородом на протяжении всего года, что делает их пригодными для размещения марикультурных хозяйств. Если на всей площади акватории (177,4 тыс. га), пригодной для организации марикультурных хозяйств, разместить водорослевые плантации из сахарины японской, по верхней оптимистичной оценке дающие урожай около 100 т/га ежегодно (или в пересчете на сухую массу около 10 т/год), то урожай только этого вида может достигать 1,8 млн т сырой массы в год (ориентировочно 180 тыс. т на сухую массу). Конечно, полученная величина может рас-

считываться как ориентир, на котором в дальнейшем мы будем строить модельные расчеты по приемной емкости залива Анива к водорослевым плантациям. При содержании углерода в сухой массе *Saccharina japonica* в среднем 27,5% [Gao et al., 2022] выращенная масса водорослей будет содержать порядка 49,5 тыс. т С. Учитывая соотношение C:N:P = 183:9:1 в тканях сахарины японской [Atkinson, Smith, 1983], можно рассчитать, что в процессе роста сахарина утилизировала 2,5 тыс. т минерального азота и 270 т минерального фосфора.

Для бентосных водорослей после получения данных о соотношениях углерода, азота и фосфора

было предложено следующее балансовое уравнение фотосинтеза, позволившее существенно изменить представление о величине первичной продукции бентосных макрофитов в сторону ее увеличения [Atkinson, Smith, 1983]:

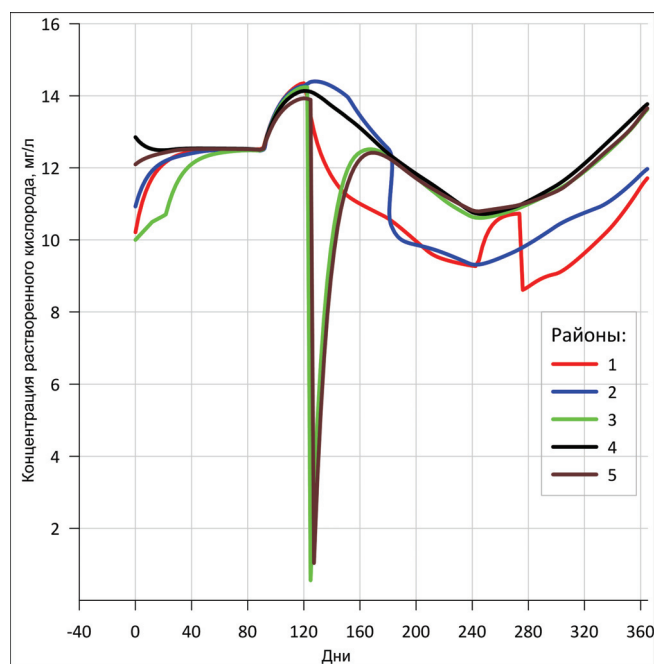
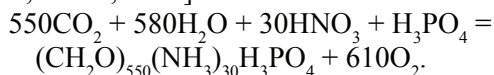


Рис. 2. Изменчивость концентраций O_2 для районов 1–5 залива Анива по результатам моделирования

Fig. 2. Variability of O_2 concentrations for Patches 1–5 of the Aniva Bay based on modelling results

Отмечается увеличение содержания растворенного кислорода в слое 0–3 м в местах культивирования водорослей на 21%, исходя из соотношения, что на каждую тонну зафиксированного углерода (при условии удаления и переработки биомассы для длительного хранения) выделяется 2,67 т кислорода (без учета его поглощения в темное время суток на дыхание) [Gao et al., 2022]. По подсчетам верхнего уровня оптимизма выращенная биомасса (при полной утилизации для долговременного хранения и исключения возможности попадания в круговорот органического вещества в заливе) сможет дать дополнительно 132 тыс. т O_2 .

Теперь рассмотрим роль естественных поселений макрофитов в обеспечении кислородом прибрежных вод.

В морских экосистемах огромную роль в потоках растворенных газов играют организмы. В открытых районах моря главенствующую роль в насыщении воды O_2 и поглощении CO_2 играют микроорганизмы, в прибрежных районах — это и макрофиты. И леса водорослей и луга морских трав значительно влияют как на вертикальные, так и на

горизонтальные векторы газовых потоков. Хорошо известно, что в зарослях макрофитов даже летом при высоких температурах воды и низком содержании биогенных элементов, препятствующих развитию фитопланктона, содержание кислорода всегда выше предела насыщения. Хотя поглощение O_2 на дыхание той же zostеры в естественных поселениях может даже превышать выделение O_2 при фотосинтезе [Rasmussen et al., 2017].

В заливе Анива в прибрежной зоне произрастает 86 видов макрофитов, преимущественно до глубины 25 м. Морских трав отмечено три вида (*Zostera marina*, *Z. asiatica*, *Phyllospadix iwataensis*). Травы отмечены на участках с песчаными и песчано-галечниковыми, скалисто-каменистыми донными грунтами. Они могут составлять как монодоминантные луга, так и участвовать в сложении многовидового фитоценоза. В разных биотопах средняя биомасса трав может достигать 13,3–477,7 г/м² [Щукина и др., 2003]. В среднем для залива можно принять величину 206 г/м².

Среди водорослей доминирует по биомассе бурая водоросль сахарина японская, площадь зарослей которой в заливе составляет 15,25 км², а общая биомасса 42,41 тыс. т [Аминина и др., 2014]. Удельная биомасса сахарины изменялась в диапазоне от 0,001 до 12,3 кг/м², в среднем по заливу составляет 2,035 кг/м², что на порядок больше, чем средняя биомасса морских трав. Основные места произрастания морских трав и районы добычи сахарины японской в заливе Анива представлены на рис. 3. Наиболее плотные скопления сахарины отмечены в северной части залива (с. 3-я Падь — с. Озерский), где сосредоточено до 83% промыслового запаса этого вида для залива [Аминина и др., 2014].

Эта огромная растительная биомасса, несомненно, влияет на баланс углерода и кислорода в прибрежных водах. Ежегодно только сахарина японская фиксирует в своей биомассе не менее 1,2 тыс. т С и поставляет не менее 3,1 тыс. т O_2 . Но в отличие от выращенной биомассы, наличная биомасса всех макрофитов останется в системе, будет разрушаться в процессе жизненного цикла и при этом на окисление будет расходоваться кислород, а накопленный в биомассе углерод вновь вернется в быстрый круговорот, за исключением той доли, которая будет снесена в центральную глубоководную часть залива, где будет медленно разлагаться почти в анаэробных условиях.

Таким образом, полученные модельные оценки могут являться точкой отсчета для определения базовой линии по содержанию растворенного кислорода и составления балансовых уравнений потоков газов в системе «океан — атмосфера» в заливе Анива до начала развития морских водорослевых плантаций, выполняющих попутно роль карбоновых ферм.

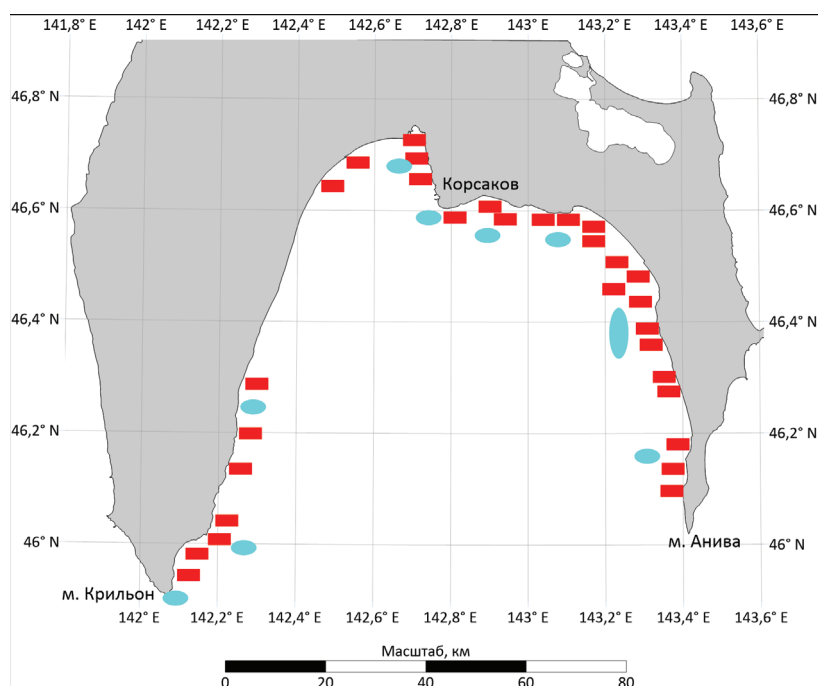


Рис. 3. Места произрастания морских трав в заливе Анива – прямоугольники [Щукина и др., 2003] и мест добычи сахарины японской – овалы [Аминина и др., 2014]

Fig. 3. Places of sea grasses growth in the Aniva Bay are indicated by red rectangles [Shchukina et al., 2003]. The sites of extraction of Japanese saccharin are indicated by blue ellipses [Aminina et al., 2014]

ВЫВОДЫ

Для вод залива Анива с помощью CNPSi-модели воспроизведено внутригодовое изменение концентраций растворенного O_2 в пяти выделенных в заливе районах для определения рисков в размещении марикультурных ферм. Район 1 резко отличается от других (наиболее мелководный и распресненный), район 2 характеризует выраженный водообмен с районами 3 и 4, весной в этих районах формируются и выделяются два слоя, летом толща воды однородна; район 3 имеет свободный водообмен с открытыми водами пролива Лаперуза; район 4 относится к глубоководной части залива, его отличительная особенность – характерное опускание вод в центре антициклонического круговорота и максимальное заглубление термоклина (до 60–70 м). Район 5 расположен вдоль западного побережья Тонино-Анивского п-ова и характеризуется наличием постоянного апвеллинга вод в безледный период, что отчетливо выражается пониженными значениями температуры воды. Расчет показал, что в районах, пригодных для размещения марикультурных ферм, прибрежные воды обеспечены кислородом в течении всего года. Анаэробные условия складываются только в самых глубоководных местах залива в весенний период.

Благодарность. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБОУ ВО «СахГУ» по теме «Углеродный баланс биоморфолитосистем побережья и прилегающих морских акваторий окраинных морей Дальнего Востока (FEFF-2022-0027)».

В заливе Анива дополнительным источником кислорода служат естественные заросли макрофитов, среди которых по биомассе и занимаемой площади доминирует сахарина японская (*Saccharina japonica*). Ежегодно только сахарина японская фиксирует в своей биомассе не менее 1,2 тыс. т С и поставляет не менее 3,1 тыс. т O_2 . Но в отличие от выращенной биомассы, наличная биомасса всех макрофитов останется в системе, будет разрушаться в процессе жизненного цикла и при этом на окисление будет расходоваться кислород, а накопленный в биомассе углерод вновь вернется в быстрый круговорот, за исключением той доли, которая будет снесена в центральную глубоководную часть залива, где будет медленно разлагаться почти в анаэробных условиях.

В заливе возможно дополнительно размещать водорослевые плантации, которые могут ежегодно фиксировать до 49,5 тыс. т С, при этом дополнительно выделяя до 132 тыс. т O_2 . Полученные модельные оценки могут являться точкой отсчета для определения «базовой линии» по содержанию растворенного кислорода и составления балансовых уравнений потоков газов в системе «океан – атмосфера» в заливе Анива до начала развития морских водорослевых плантаций, выполняющих попутно роль карбоновых ферм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аминина Н.М., Вишневецкая Т.И., Галанин Д.А. и др. Характеристика промысловых запасов Сахарины японской в заливе Анива (Охотское море) // Изв. ТИНРО. 2014. Т. 178. С. 116–123.
- Афанасьев В.В. Строение и развитие берегов контактной зоны умеренных и субарктических морей северной Пацифики: дис. ... д-ра геогр. наук. Южно-Сахалинск, 2018. 345 с.
- Брагина И.Ю. Сезонная и межгодовая изменчивость зоопланктона по результатам исследований 1995–1999 гг. в проливе Лаперуза (Соя) и прилегающих водах // Труды СахНИРО. 2002. Т. 4. С. 48–69.
- Леонов А.В., Пищальник В.М., Заринов О.М. Моделирование природных процессов: система отображения результатов расчетов на CNPSi-модели. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2012. 148 с.
- Леонов А.В., Сапожников В.В. Биогидрохимическая модель трансформации органогенных веществ и ее использование для расчета первичной продукции в экосистеме Охотского моря / Комплексные исследования Охотского моря. М.: ВНИРО, 1997. С. 143–166.
- Низяев С.А. Экологические аспекты многолетнего распределения камчатского краба *Paralithodes camtschaticus* в заливе Анива (о. Сахалин) // Геосистемы переходных зон. 2022. № 6(4). С. 388–404. DOI: 10.30730/gtrz.2022.6.4.388-404.
- Пищальник В.М., Бобков А.О. Океанографический атлас шельфовой зоны острова Сахалин. Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 2000. Ч. I. 174 с.
- Поньрко О.А., Крупнова Т.Н. Выращивание ламинарии японской (*Saccharina japonica*) из цеховой рассады // Материалы VI Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Комплексные исследования в рыбохозяйственной отрасли» (Владивосток, 27 ноября 2020 года). Владивосток: Дальневосточный гос. тех. рыбохозяйственный ун-т, 2021. С. 120–124.
- Щукина Г.Ф., Галанин Д.А., Балконская Л.А. и др. Структура и распределение прибрежных донных сообществ залива Анива // Труды СахНИРО. 2003. Т. 5. С. 3–24.
- Atkinson M., Smith S.V. C : N : P ratios of benthic marine plants, *Limnol. Oceanogr.*, 1983, vol. 28(3), p. 568–574, DOI: 10.4319/LO.1983.28.3.0568.
- Claret M., Galbraith E.D., Palter J.B. et al. Rapid coastal deoxygenation due to ocean circulation shift in the north-west Atlantic, *Nat. Clim. Change*, 2018, vol. 8, p. 868–72.
- Duarte C.M., Wu J., Xiao X. et al. Can Seaweed Farming Play a Role in Climate Change Mitigation and Adaptation? *Front. Mar. Sci.*, 2017, vol. 4:100, DOI: 10.3389/fmars.2017.00100.
- Duarte C.M., Gattuso J.-P., Hancke K. et al. Global estimates of the extent and production of macroalgal forests, *Global Ecol Biogeogr.*, 2022, vol. 31, p. 1422–1439, DOI: 10.1111/geb.13515.
- Gao G., Gao L., Jiang M. et al. The potential of seaweed cultivation to achieve carbon neutrality and mitigate deoxygenation and eutrophication, *Environ. Res. Lett.*, 2022, vol. 17(014018), DOI: 10.1088/1748-9326/ac3fd9.
- Keeling R.F., Körtzinger A., Gruber N. Ocean deoxygenation in a warming world, *Ann. Rev. Mar. Sci.*, 2010, vol. 2, p. 199–229.
- Mahmood T., Fang J., Jiang Z., Zhang J. Carbon and nitrogen flow, and trophic relationships, among the cultured species in an integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) bay, *Aquaculture Environment Interactions*, 2016, vol. 8, p. 207–219.
- Maslennikov S.I. Marine Biological Resources in the Far Eastern Coast: Their Rational Use from Ecological and Economic Viewpoints, *Energy and environment in Slavic Eurasia: toward the establishment of the network of environmental studies in the Pan-Okhotsk region*, Sapporo, Slavik Research Center, Hokkaido University, 2008, p. 89–125.
- Norwegian Blue Forest Network Annual Report 2021, GRID-Arendal, Institute for Marine Research, Norwegian Institute for Water Research, 2022.
- Out of the blue: The value of seagrasses to the environment and to people, United Nations Environment Programme, 2020, UNEP, Nairobi, 96 p.
- Pishchal'nik V.M., Leonov A.V. Studying the Ecosystem Functioning Conditions in Aniva Bay-La Perouse Strait, *Water Resources*, 2003, vol. 30, no. 5, p. 569–588, DOI: 10.1023/A:1025741516922.
- Pishchal'nik V.M., Arkhipkin V.S., Leonov A.V. Thermohaline analysis of the La Perouse Strait water, *Water Resources*, 2005, vol. 32, no. 1, p. 13–22, DOI: 10.1007/s11268-005-0003-6.
- Rabalais N.N., Cai W.J., Carstensen J. et al. Eutrophication-driven deoxygenation in the coastal ocean, *Oceanography*, 2014, vol. 27, p. 172–83.
- Rasmusson L.M., Lauritano C., Procaccini G. et al. Respiratory oxygen consumption in the seagrass *Zostera marina* varies on a diel basis and is partly affected by light, *Mar. Biol.*, 2017, vol. 164(6), 140, DOI: 10.1007/s00227-017-3168-z.
- Troell M., Henriksson P.J.G., Buschmann A.H. et al. Farming the Ocean – Seaweeds as a Quick Fix for the Climate? *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 2022, DOI: 10.1080/23308249.2022.2048792.

Электронный ресурс

Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 года № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». 151 с. URL: https://www.chemanalytica.ru/f/prikaz_minсельхозa_rossii_ot_13122016_n_552_ob_utverzhdenii_pdk.pdf?ysclid=lmawswv43c875783036 (дата обращения 12.04.2022).

Поступила в редакцию 11.01.2023

После доработки 24.06.2023

Принята к публикации 27.07.2023

MODELING THE DYNAMICS OF DISSOLVED OXYGEN CONCENTRATION IN WATERS OF THE ANIVA BAY (THE SEA OF OKHOTSK)

A.V. Leonov¹, V.S. Arkhipkin², V.M. Pishchalnik³, E.M. Latkovskaya⁴

¹ Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Laboratory of Geochemistry, Chief Scientific Researcher, Professor; D.Sc. in Chemistry; e-mail: leonov@ocean.ru

² Lomonosov Moscow State University, Department of Oceanology, Associate Professor, Ph.D. In Geography; e-mail: victor.arkhipkin@gmail.com

³ Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Laboratory of Wave Dynamics and Coastal Currents, Professor; D.Sc. in Engineering; e-mail: vpishchalnik@rambler.ru

⁴ Sakhalin State University, Laboratory of chemical-biological research, Head of the Laboratory, Ph.D. in Biology; e-mail: elena-sazon02@yandex.ru

To determine the risks for mariculture farms, the intra-annual change of dissolved O₂ concentration was simulated for five zones in the Aniva Bay using the CNPSi model. Zone 1 differed sharply from other zones as the most shallow and freshened. Zone 2 is characterized by a pronounced water exchange with Zone 3 and Zone 4: during spring two layers were formed and stood out in these zones, in the summer the water column was homogeneous. Zone 3 has free water exchange with the open waters of the La Perouse Strait. An outstanding feature of Zone 4, in the deep-water part of the bay, was a distinctive subsidence of waters in the centre of the anticyclonic circulation and the maximum thermocline depth (up to 60–70 m). Zone 5 extends along the western coast of the Tonino-Aniva Peninsula and is characterized by the constant upwelling of waters during the ice-free period, which is clearly expressed by lower water temperatures. The calculation showed that in the areas suitable for mariculture farms coastal waters were provided with oxygen throughout the year. Anaerobic conditions developed in spring only in the deepest parts of the bay. An additional source of oxygen in the Aniva Bay is natural thickets of macrophytes, among which the Japanese saccharin (*Saccharina japonica*) dominates in terms of biomass and area. Annually, Japanese saccharin itself absorbed at least 1200 tons of C in its biomass and supplied at least 3100 tons of O₂. Unlike the artificially grown biomass, the biomass of all macrophytes would remain in the system and be destroyed during the life cycle, and the oxygen would be consumed for oxidation. The carbon accumulated in the biomass would again return to the rapid cycle, with the exception of the amount transported to the deep central part of the bay, where it would slowly decompose under nearly anaerobic conditions. It would be possible to place additional algae plantations in the bay, which could absorb up to 49 500 tons of C annually, while supplying up to 132 000 tons of O₂. The obtained model estimates could be a starting point for determining the “baseline” of the content of dissolved oxygen and compiling balance equations for gas flows in the ocean-atmosphere system in the Aniva Bay before the development of seaweed plantations, which simultaneously act as carbon farms.

Keywords: the Aniva Bay, oxygen, CNPSi model, sea farming, carbonic landfill, carbon and oxygen balance

Acknowledgements. The work was carried out under the state task of the Sakhalin State University “Carbon balance of biomorpholithological systems of the coast and adjacent water areas of the open seas of the Far East” (FEFF-2022-0027).

REFERENCES

- Afanas'ev V.V. *Stroenie i razvitie beregov kontaktnoi zony umerennykh i subarkticheskikh morei severnoi Patsifiki* [Structure and development of coasts of the contact zone between the boreal and subarctic seas of the Northern Pacific], Ph.D. Thesis in Geography, Yuzhno-Sakhalinsk, 2018, 345 p. (In Russian)
- Aminina N.M., Vishnevskaya T.I., Galanin D.A., Repnikova A.R., Guruleva O.N. Kharakteristika promyslovykh zapasov Sakhariny yaponskoi v zalive Aniva (Okhotskoe more) [Description of *Saccharina japonica* commercial stock in the Aniva Bay (the Okhotsk Sea)], *Izv. TINRO*, 2014, vol. 17, p. 116–123. (In Russian)
- Atkinson M., Smith S.V. C : N : P ratios of benthic marine plants, *Limnol. Oceanogr.*, 1983, vol. 28(3), p. 568–574, DOI: 10.4319/LO.1983.28.3.0568.
- Bragina I.Yu. Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' zooplanktona po rezul'tatam issledovaniy 1995–1999 gg. v prolike Laperuza (Soya) i prilezhashchikh vodakh [Seasonal and interannual variability of zooplankton according to the results of 1995–1999 studies in the Laperouse Strait (Soya) and adjacent waters], *Trudy SakhNIRO*, 2002, vol. 4, p. 48–69. (In Russian)
- Claret M., Galbraith E.D., Palter J.B. et al. Rapid coastal deoxygenation due to ocean circulation shift in the north-west Atlantic, *Nat. Clim. Change*, 2018, vol. 8, p. 868–72.
- Duarte C.M., Gattuso J.-P., Hancke K. et al. Global estimates of the extent and production of macroalgal forests, *Global Ecol Biogeogr.*, 2022, vol. 31, p. 1422–1439, DOI: 10.1111/geb.13515.
- Duarte C.M., Wu J., Xiao X. et al. Can Seaweed Farming Play a Role in Climate Change Mitigation and Adaptation? *Front. Mar. Sci.*, 2017, vol. 4:100, DOI: 10.3389/fmars.2017.00100.
- Gao G., Gao L., Jiang M. et al. The potential of seaweed cultivation to achieve carbon neutrality and mitigate deoxygenation and eutrophication, *Environ. Res. Lett.*, 2022, vol. 17(014018), DOI: 10.1088/1748-9326/ac3fd9.

- Keeling R.F., Körtzinger A., Gruber N. Ocean deoxygenation in a warming world, *Ann. Rev. Mar. Sci.*, 2010, vol. 2, p. 199–229.
- Leonov A.V., Pishchal'nik V.M., Zaripov O.M. *Modelirovanie prirodnykh protsessov: sistema otobrazheniya rezul'tatov raschetov na CNPSi-modeli* [Modeling of natural processes. A system for displaying calculation results on a CNPSi model], Yuzhno-Sakhalinsk, Sakhalin State University Publ., 2012, 148 p. (In Russian)
- Leonov A.V., Sapozhnikov V.V. [Biohydrochemical Model of Organogenic Matter and its Use for the Calculation of Primary Production in the Sea of Okhotsk Ecosystem], *Kompleksnye issledovaniya Okhotskogo moray* [Complex studies of the Okhotsk Sea], Moscow, VNIRO Publ., 1997, p. 143–166. (In Russian)
- Mahmood T., Fang J., Jiang Z., Zhang J. Carbon and nitrogen flow, and trophic relationships, among the cultured species in an integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) bay, *Aquaculture Environment Interactions*, 2016, vol. 8, p. 207–219.
- Maslennikov S.I. Marine Biological Resources in the Far Eastern Coast: Their Rational Use from Ecological and Economic Viewpoints, *Energy and environment in Slavic Eurasia: toward the establishment of the network of environmental studies in the Pan-Okhotsk region*, Sapporo, Slavik Research Center, Hokkaido University, 2008, p. 89–125.
- Norwegian Blue Forest Network Annual Report 2021*, GRID-Arendal, Institute for Marine Research, Norwegian Institute for Water Research, 2022.
- Out of the blue: The value of seagrasses to the environment and to people*, United Nations Environment Programme, 2020, UNEP, Nairobi, 96 p.
- Patin S.A. *Ekologicheskie problemy osvoeniya neftegazovykh resursov morskogo shel'fa* [Ecological problems of the development of oil and gas resources of the offshore shelf], Moscow, VNIRO Publ., 1997, 350 p. (In Russian)
- Patin S.A. *Neft' i ekologiya kontinental'nogo shel'fa* [Oil and ecology of the continental shelf], Moscow, VNIRO Publ., 2001, 247 p. (In Russian)
- Pishchal'nik V.M., Bobkov A.O. *Okeanograficheskii atlas shel'fovoi zony ostrova Sakhalin* [Oceanographic atlas of the Sakhalin Island shelf zone], Yuzhno-Sakhalinsk, Sakhalin State University Publ., 2000, part I, 174 p. (In Russian)
- Pishchal'nik V.M., Arkhipkin V.S., Leonov A.V. Thermohaline analysis of the La Perouse Strait water, *Water Resources*, 2005, vol. 32, no. 1, p. 13–22, DOI: 10.1007/s11268-005-0003-6.
- Pishchal'nik V.M., Leonov A.V. Studying the Ecosystem Functioning Conditions in Aniva Bay-La Perouse Strait, *Water Resources*, 2003, vol. 30, no. 5, p. 569–588, DOI: 10.1023/A:1025741516922.
- Ponyrko O.A., Krupnova T.N. [Cultivation of Japanese kelp (*Saccharina japonica*) from workshop seedlings], materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, *Kompleksnye issledovaniya v rybokhozyaistvennoi otrasli* [Complex studies in fishery], Vladivostok, Dal'nevostochnyi gos. Tekh. rybokhozyaistvennyi un-t Publ., 2021, p. 120–124. (In Russian)
- Rabalais N.N., Cai W.J., Carstensen J. et al. Eutrophication-driven deoxygenation in the coastal ocean, *Oceanography*, 2014, vol. 27, p. 172–83.
- Rasmusson L.M., Lauritano C., Procaccini G. et al. Respiratory oxygen consumption in the seagrass *Zostera marina* varies on a diel basis and is partly affected by light, *Mar. Biol.*, 2017, vol. 164(6), 140, DOI: 10.1007/s00227-017-3168-z.
- Shchukina G.F., Galanin D.A., Balkonskaya L.A. et al. Struktura i raspredelenie pribrezhnykh donnykh soobshchestv zaliva Aniva [Structure and distribution of coastal bottom communities of the Aniva Bay], *Trudy SakhNIRO*, 2003, vol. 5, p. 3–24. (In Russian)
- Troell M., Henriksson P.J.G., Buschmann A.H. et al. Farming the Ocean – Seaweeds as a Quick Fix for the Climate? *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 2022, DOI: 10.1080/23308249.2022.2048792.
- Web source*
- Prikaz Ministerstva sel'skogo khozyaistva Rossiiskoi Federatsii ot 13 dekabrya 2016 goda № 552 “Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnykh ob’ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel’no dopustimyykh kontsentratsii vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob’ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya” [On approval of water quality standards for water bodies, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance], URL: https://www.chemanalytica.ru/f/prikaz_minselk_hoza_rossii_ot_13122016_n_552_ob_utverzhdenii_pdk.pdf?ysclid=lmanwsv43c875783036 (access date 12.04.2022).

Received 11.01.2023

Revised 24.06.2023

Accepted 27.07.2023