

УДК 551.46.072:595.384.2

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНСТОНСКОЙ ОКЕАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ (ПОМ) НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТА МЕСТ ОСЕДАНИЯ ЛИЧИНОК КОЛЮЧЕГО КРАБА (*PARALITHODES BREVIPES*)

Ю. Ю. Никонов<sup>1</sup> (ny@sakhmeteo.ru),  
А. С. Красненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АНО «Сахалинское метеоагентство» (Южно-Сахалинск); <sup>2</sup> Ikaruga Inc. (Дзуси, Япония)

Никонов, Ю. Ю. Применение Принстонской океанической модели (ПОМ) на примере расчета мест оседания личинок колючего краба (*Paralithodes brevipes*) [Текст] / Ю. Ю. Никонов, А. С. Красненко // Ресурсы колючего краба, перспективы использования и условия обитания в Охотском море : Труды Сахалинского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. – Южно-Сахалинск : СахНИРО, 2010. – Т. 11. – С. 77–88.

В статье представлены результаты численного моделирования гидродинамических параметров и полей концентрации личинок колючего краба. Описаны условия моделирования для проведения экспериментов при использовании численной трехмерной Принстонской океанологической модели. Рассчитаны поля поверхностных и донных течений, вертикальных скоростей, средней концентрации зоопланктона и концентрации личинок колючего краба в придонном слое для рассматриваемого региона.

Табл. – 1, ил. – 7, библиогр. – 12.

Nikonov, Yu. Yu. Application of Princeton Ocean Model (POM) when calculating locations for larval settlement of Hanasaki crab (*Paralithodes brevipes*) [Text] / Yu. Yu. Nikonov, A. S. Krasnenko // Stock abundance, habitat condition, and fishery prospects of Hanasaki crab (*Paralithodes brevipes*) in the Sea of Okhotsk : Transactions of the Sakhalin Research Institute of Fisheries and Oceanography. – Yuzhno-Sakhalinsk : SakhNIRO, 2010. – Vol. 11. – P. 77–88.

There are presented the results of numerical modeling of hydrodynamic parameters and fields of Hanasaki larvae concentrations. To perform experiments using a three-dimensional numerical Princeton Ocean Model, the modeling conditions are described. The fields of surface and bottom currents, vertical velocities, mean zooplankton concentration and concentration of Hanasaki crab larvae in the near-bottom layer are calculated for the considered area.

Tabl. – 1, fig. – 7, ref. – 12.

### ВВЕДЕНИЕ

Популяция колючего краба (*Paralithodes brevipes*) обитает естественным образом на акватории Южно-Курильского пролива и прилегающих к нему территориях. Эксплуатирование популяции привело к ограничению на добычу данного вида и постановке задач по восстановлению численности. В этом свете определение мест массового оседания личинок важно для дальнейших мероприятий, направленных на сохранение особей краба на ранних стадиях их развития.

Район Южно-Курильского пролива отличается сложным гидродинамическим режимом, обусловленным зоной контакта вод различного происхождения (субарктические и субтропические). Большое количество вихревых потоков, образующихся в месте соединения разнонаправленных вод (Богданов, Мороз, 2004), затрудняет математическое описание поведения водных масс для последующего анализа распределения биогенных элементов и личинок колючего краба. Принципы численного моделирования, дополняющие натурные исследования, позволяют описать процесс динамики водных масс в зависимости от различных внешних факторов, таких, как изменение рельефа дна или формы береговых участков, воздействие ветра на морскую поверхность и т. д. Также расширяются рамки анализа пространственного распределения плотности скопления личинок, потоков биогенных элементов экосистемы, позволяя регулировать различные возмущающие факторы для понимания их влияния на исследуемый объект.

Целью данной работы является определение мест скопления личинок колючего краба с учетом географических, гидрологических и экосистемных особенностей вод, омывающих южные Курильские острова.

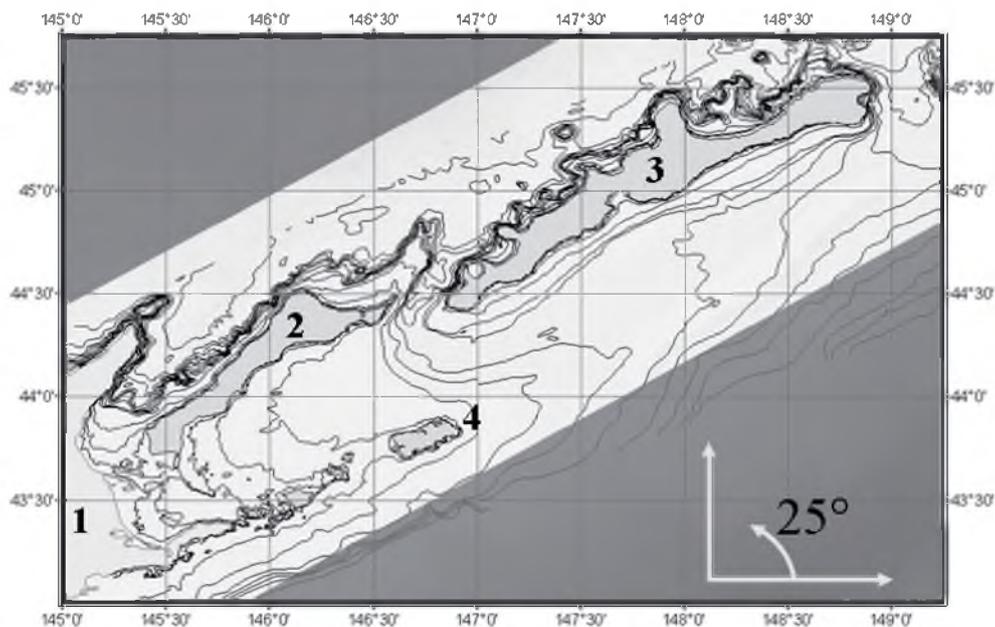
В ходе работы было рассмотрено влияние на дрейф личинок таких факторов, как: периодические течения (с учетом основных гармоник), сезонные течения Соя и Ойясио, зарождающиеся за пределами рассматриваемого региона, взаимодействия компонентов биологической системы (с учетом азотного и фосфорного цикла взаимодействий биогенов), вертикальные миграции личинок. Также проведено сравнение возможных мест концентрации личинок колючего краба, полученных при расчетах с различными начальными распределениями, позволяющее более точно описать места, благоприятствующие развитию популяции краба.

## ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

На ранних стадиях численный эксперимент проводился для прямоугольного участка акватории, ограниченного координатами  $145^{\circ}$  в. д.,  $43^{\circ}$  с. ш. и  $147^{\circ}$  в. д.,  $45^{\circ}$  с. ш. В дальнейшем область моделирования была расширена на восток (до  $149,5^{\circ}$  в. д.) с целью охвата акватории острова Итуруп для более точного описания влияния на исследуемый регион течения Ойясио и исследования распространения личинок краба через пролив Екатерины. При ориентации модельной сетки по меридиально-параллельным направлениям мы столкнулись с проблемами, вызванными очень большим градиентом изменения глубин. Относительно мелководные участки при такой ориентации занимали не более половины территории модельной сетки. Отметим, что глубоководные участки Тихого океана и Охотского моря, как правило, неинформативны при изучении вопроса переноса личинок. Таким образом, было принято решение отсечения этих территорий путем поворота модельной сетки на  $25$  градусов (**рис. 1**). Влияние глубоководной акватории, на наш взгляд, хорошо учитывалось введением в расчет приливов.

Поворот модельной сетки позволил сократить зону расчета по сравнению с прошлыми экспериментами в два раза. При этом рельеф дна стал более пологим и перепад глубин сильно уменьшился, что позволило отказаться от разбиения толщи воды на большое количество слоев. Данное обстоятельство привело к снижению нагрузки при расчетах без потери точности.

Для проведения эксперимента была выбрана и адаптирована к физико-географическим условиям акватории южных Курильских островов широко применяемая в настоящее время трехмерная гидродинамическая модель, использующая сигма-координатную систему, – Принстонская океаническая модель (POM) (Ezer, Mellor, 2000; Lui et al., 2002). Конечное моделирование проводилось при равномерной сетке размером  $74 \times 30$  квадратных ячеек с линейным размером каждой 5 000 метров. По вертикали использовались пять слоев с пропорцией 1:1:3:5:5. Вычисления проводились в трехмерном прогнозном режиме, время расчетов – 30 моделируемых суток.



**Рис. 1.** Южно-Курильский пролив и прилегающая акватория: 1 – о. Хоккайдо, 2 – о. Кунашир, 3 – о. Итуруп, 4 – о. Шикотан

**Fig. 1.** South-Kuril Strait and adjoining area: 1 – Hokkaido Island, 2 – Kunashir Island, 3 – Iturup Island, 4 – Shikotan Island

При проведении расчетов значения атмосферных характеристик были выбраны на основе многолетних данных для города Курильска (о. Итуруп). В ходе моделирования атмосферные параметры линейно менялись от значений, характерных в мае, до июньского уровня (Гидрометеорология и гидрохимия..., 2003; Научно-прикладной справочник..., 2003):

- атмосферное давление – 1010,5–1010,1 гПа,
- температура воздуха – 5,9–9,2°C,
- влажность – 80–89%,
- облачность – 0,77–0,74,
- ветер северо-северо-западный – западный,
- скорость ветра – 4,8–3,4 м/с.

Начальные поля распределений для солёности, температуры воды были построены на основе экспедиционных данных СахНИРО, данных спутниковых наблюдений, сторонних литературных источников. Интерполяция дискретных данных проводилась с помощью линейно-триангуляционных методов.

Распределения биологических элементов модели соответствуют среднегодовым значениям в рассматриваемом регионе. Начальные условия для биогенов были рассмотрены в работе Ю. Ю. Никонова, А. С. Красненко (2006).

### Гидродинамические взаимодействия в модели

При моделировании использовались уравнения движения, уравнение свободной поверхности, неразрывности, уравнения баланса температуры, переноса солей. Расчет движения водных массивов происходил с учетом горизонтальной и вертикальной турбулентной вязкостей (Mellor, 2004).

Влияние ветра задавалось через касательное напряжение ветра ( $\tau_u, \tau_v$ ) следующим образом:

$$\langle \tau_u \rangle = 1,935 \cdot 10^{-6} \cdot U_{wind}^2 \quad (1)$$

$$\langle \tau_v \rangle = 1,935 \cdot 10^{-6} \cdot V_{wind}^2 \quad (2)$$

где  $U_{wind}, V_{wind}$  – компоненты скорости ветра (по оси абсцисс и ординат соответственно).

На поверхности ( $\sigma=0$ ) было принято, что нормальная компонента скорости у водных масс отсутствует, горизонтальное изменение скорости поверхностного слоя возможно при воздействии внешних факторов, также имеется теплообмен с атмосферой. Данные условия можно выразить следующими формулами:

$$\omega(0) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} = -\langle \tau_u \rangle, \quad \frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} = -\langle \tau_v \rangle, \quad (4)$$

$$\frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} = -\langle w_T \rangle, \quad (5)$$

где  $\omega$  – вертикальная (в системе  $\sigma$ -координат) компонента скорости,  $K_M$  и  $K_H$  – вертикальные коэффициенты турбулентных вязкости и диффузии,  $D$  – глубина с учетом уровня свободной поверхности,  $T$  – температура воды,  $w_T$  – dsf.

У дна ( $\sigma=-1$ ) вводились условия отсутствия нормальной составляющей скорости воды, наличия трения о дно, а также отсутствия водообмена с подземными источниками:

$$\omega(-1) = 0, \quad (6)$$

$$\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot U \cdot \sqrt{U^2 + V^2}, \quad \frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot V \cdot \sqrt{U^2 + V^2}, \quad (7)$$

$$\frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} = 0, \quad \frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} = 0. \quad (8)$$

На границе с береговой линией задавалось условие отсутствия нормальной к берегу компоненты скорости, также считалось, что на данных границах отсутствовали потоки тепла и соли.

Для моделирования приливов было решено использовать четыре основных гармоники с параметрами, рассчитанными для станции Буревестник (тихоокеанская сторона о. Итуруп) с помощью программного обеспечения Сахалинского Центра цунами (табл.).

Таблица

**Параметры гармоник приливных течений,  
рассчитанных для станции Буревестник**

Table

**Parameters of tidal harmonics calculated for Burevestnik station**

	M2	S2	K1	O1
Амплитуда, м	0,275	0,117	0,311	0,202
Фаза, угл. град.	162,5	209,2	359,3	328,8

Для расчета воздействия глобальных течений, возникающих за пределами модельной сетки (Соя и Ойясио) вводились дополнительные граничные условия для нормальной составляющей течений. Течение Соя, характеризующееся более теплыми водами, вводилось как поток над северо-восточным побережьем о. Хоккайдо с температурой 12° и соленостью 32‰ со скоростью в верхнем слое 2–4 см/с. Аналогичным образом вводилось возмущение, описывающее течение Ойясио. Поток располагался южнее острова Итуруп, температура воды 2° с соленостью 33‰, при скорости течения 6–12 см/с.

**Учет солнечной радиации в модели**

Солнечная радиация рассчитывалась на основе солнечного потока для горизонтальной поверхности на широте 44° и считалась постоянной для всех точек модельной сетки.

В достаточно хорошем приближении можно рассматривать морскую поверхность как строго горизонтальную, что позволяет определять угол падения потока солнечной радиации согласно следующему выражению (Кондратьев и др., 1978):

$$\cos i = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \tau, \quad (9)$$

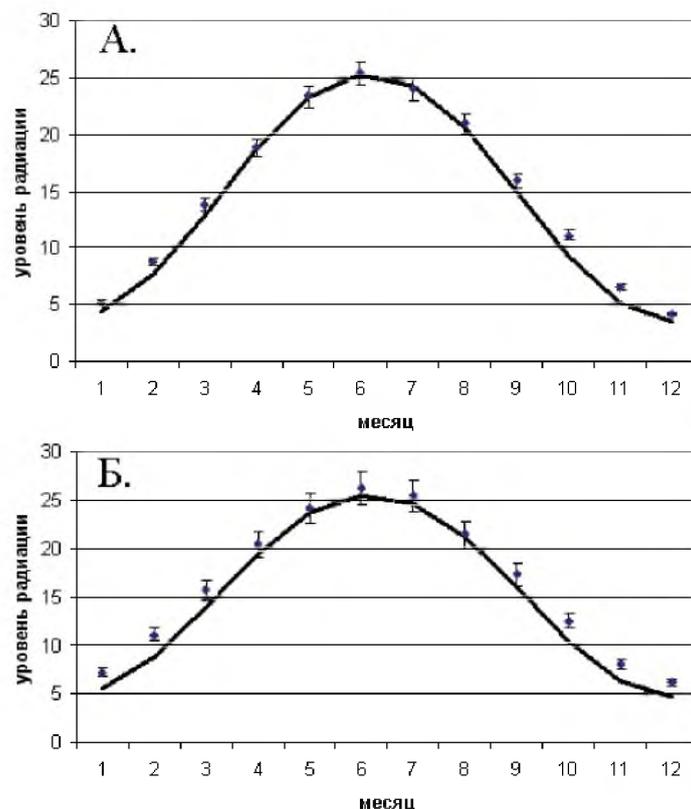
где  $i$  – угол падения солнечных лучей на поверхность,  
 $\delta = 23,5 \cdot 2 \cdot \pi / 360 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot (d - 81) / 365)$  – склонение Солнца,  
 $d$  – число дней, прошедшее с начала года (1 января),  
 $\varphi$  – широта местности, где расположено сооружение,  
 $\tau = t \cdot \pi / 12$  – часовой угол Солнца,  
 $t$  – модельное время суток.

Окончательное вычисление уровня прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность, с учетом поправки на наличие облаков и отражением падающей солнечной энергии от поверхности воды, согласно Мацуике (1970; по: Иванов, 1978), выглядело следующим образом:

$$S = SC \cdot (1,1254 \cdot \cos i - 0,1366) \cdot (1 - 0,52 \cdot n^{1,3}) \cdot (1 - \beta), \quad (10)$$

где  $n$  – коэффициент облачности,  $\beta = 0,5$  – альbedo водной поверхности,  $SC = 1367 \pm 6 \text{ Вт/м}^2 = 3,2477 \cdot 10^{-4} \text{ кал} \cdot \text{м/с}$  – поток прямой солнечной радиации на поверхность, расположенную перпендикулярно направлению лучей.

Для проверки данной модели на правильность было проведено сравнение модельных результатов со среднестатистическими данными для станций, расположенных в городах Корсаков и Южно-Курильск (соответственные широты – 46,8 и 43,75°). Результаты сравнения представлены на **рисунке 2**.



**Рис. 2.** Уровень прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность. Сплошная линия – среднегодовые данные для станций: А – Корсаков, Б – Южно-Курильск. Маркеры – расчетные значения

**Fig. 2.** Level of direct solar radiation on horizontal surface. Firm line indicates mean annual data for stations: А – Korsakov, Б – Yuzhno-Kurilsk. Markers are calculated values

Коэффициент корреляции между изменением рассчитанной и среднестатистической радиации составил 0,9985 для г. Корсакова и 0,9986 для г. Южно-Курильска. Среднее относительное отклонение данных составило для станции 8% в г. Корсакове и 11,7% для станции в г. Южно-Курильске. Наибольшие отклонения между расчетными и фактическими данными приходятся на зимний период. В случае исключения из рассмотрения периода ноябрь–февраль среднее относительное отклонение данных составило 4% для станции в г. Корсакове и 6,5% для станции в г. Южно-Курильске. Так как период исследования приходится на весенне-летние месяцы, то данный подход определения прямой суточной радиации на горизонтальную поверхность при ясном небе можно считать удовлетворительным.

Расчет коротковолновой радиации, проникающей в толщу воды на уровень  $z_p$ , происходит согласно:

$$rad = swrad \cdot \left( 0,58 \cdot \exp\left[ z_i \cdot \frac{D}{0,35} \right] + 0,42 \cdot \exp\left[ z_i \cdot \frac{D}{23} \right] \right), \quad (11)$$

где  $D \equiv H + \eta$ ,  $H$  – глубина,  $\eta$  – уровень свободной поверхности,  $swrad$  – уровень коротковолновой радиации на поверхности.

### **Биологические взаимодействия в модели**

Для описания миграций личинок краба были использованы два метода: метод взаимодействия с окружающей средой на основе биологических принципов и метод полупассивной примеси, основанный на переносе личинок водными массами.

**Метод биологических взаимодействий.** При рассмотрении личинок краба как составляющей зоопланктона решалась задача обозначения возможного перераспределения личинок колючего краба с учетом их биологических процессов в зоопланктонной стадии (Kawamiya et al., 1995; Oshima et al., 1999).

Процесс изменения биомассы личинок колючего краба ( $\Delta_{ZOO}$ ) можно записать следующим образом:

$$\Delta_{ZOO} = F_{ph} + F_{eco}, \quad (12)$$

где  $F_{ph}$  – функция, описывающая изменение биомассы, обусловленное физическими процессами (диффузионное рассеяние, адвективный перенос течениями),  $F_{eco}$  – функция, описывающая изменение биомассы, обусловленное биологическими процессами (питание фитопланктоном, выделение неусвоенных остатков, выделение продуктов дыхания, смертность).

В описываемой модели личинки краба были представлены в качестве пассивного зоопланктона, т. е. не учитывались дневные вертикальные миграции. Полная масса личинки принималась за 3,37 мг (натурные наблюдения Е. В. Абрамовой, СахНИРО). Считалось, что распределение личинок в вертикальном столбе воды неравномерно, а именно 2/3 от числа всех личинок располагалось в придонном слое, остальная часть личинок равномерно распределена в расположенных выше слоях.

Взаимодействия зоопланктона с другими компонентами биологической модели рассчитывались через азотные и фосфорные преобразования, математическое представление которых описывалось в работе Ю. Ю. Никонова, А. С. Красненко (2006).

**Метод поплавокных перемещений.** При рассмотрении личинок колючего краба как полупассивных поплавков считалось, что на их местоположение влияет только характер перемещения водных масс. При таком подходе не учитывались смертность личинок и наличие (отсутствие) кормовой базы для развития. Задача такого исследования состояла в том, чтобы обозначить наиболее привлекательные места для оседания личинок с позиции гидродинамического подхода.

Полупассивность заключалась в наличии собственной вертикальной скорости в светлое время суток (с 10 до 17 часов), рассчитанной в экспериментах С. Онода и Р. Кудо (Nemuro City Fisheries Research Institute) в 2007 г.

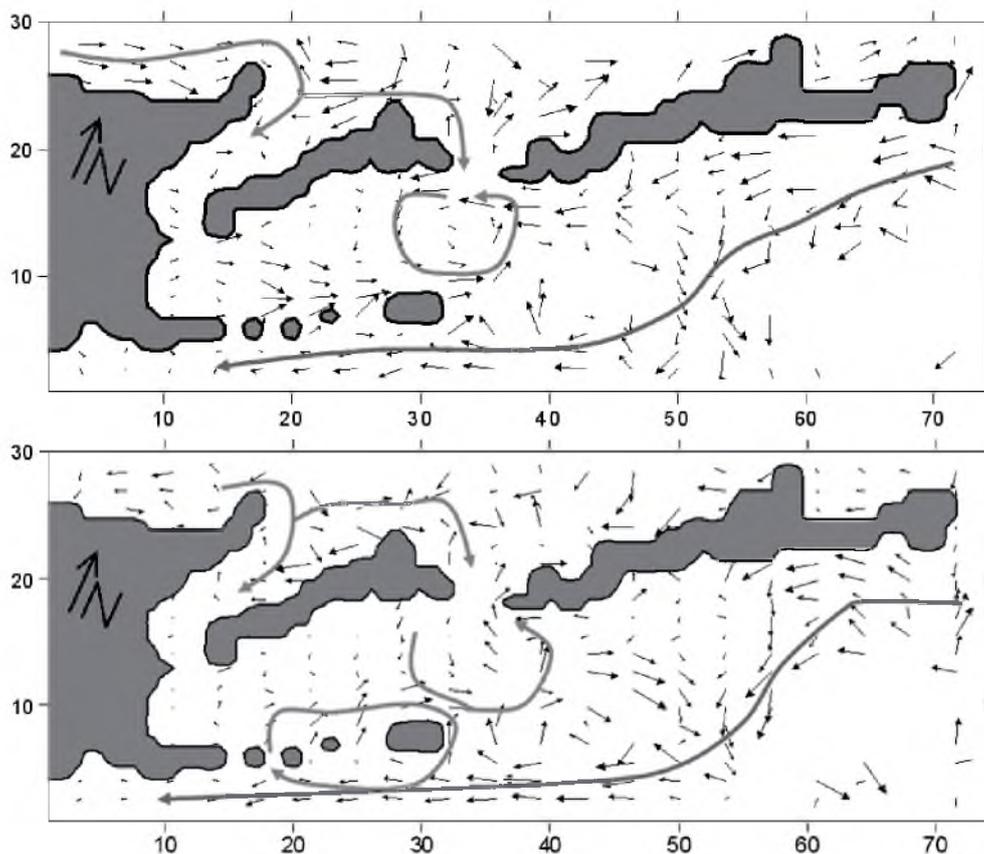
## **РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

### **Расчет гидродинамических характеристик акватории**

Рассмотрим поле течений в поверхностном слое (**рис. 3а**), которое образовывается в исследуемом регионе. Данное распределение течений важно, так как в светлое время суток большинство личинок скапливается в поверхностном слое, и, как следствие, скорость их переноса увеличивается. В поверхностном слое хорошо видны два течения, характерные для района: Соя и Ойясио. Воды Соя идут вдоль северных побережий островов Южно-Курильской гряды (с ха-

рачными скоростями 20–30 см/с), попадая в Кунаширский пролив и пролив Екатерины. Течение Ойясио омывает тихоокеанскую сторону островов (15–30 см/с) и соединяется с водами течения Соя в районе островов Шикотан (юг пролива Екатерины). Также видно, что характер течений в Южно-Курильском проливе благоприятствует сносу личинок из залива Немуро к островам малой Курильской гряды (со скоростью 2–5 см/с). Смешивание вод течений Соя и Ойясио образует циклоническое движение на севере пролива (10–15 см/с на периферии вихря), что, возможно, служит дополнительным препятствием к миграции личинок в сторону острова Итуруп.

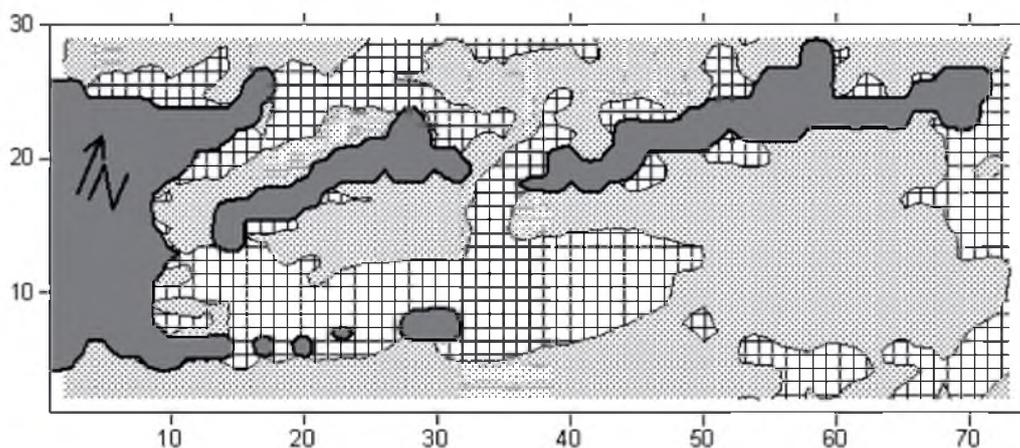
Примерно такая же картина наблюдается в придонном слое (рис. 3б). Воды течения Ойясио встречаются на севере Южно-Курильского пролива (10–15 см/с) с водами течения Соя (5–15 см/с). Характер движения в этом месте можно обозначить как циклонический с малыми скоростями (на периферии 5 см/с). Вокруг островов Малой Курильской гряды отслеживается циклонический характер движения вод со скоростями до 15 см/с, что делает этот район привлекательным для оседания личинок колючего краба.



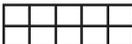
**Рис. 3.** Результат моделирования поля течений для акватории Южно-Курильского пролива (А – поверхностный слой, Б – придонный слой). Координаты приведены в модельных единицах масштаба

**Fig. 3.** A model-made field of currents for South-Kuril Strait (А – surface layer, Б – near-bottom layer). Coordinates are given in model scale units

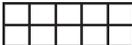
Моделирование вертикальных течений (рис. 4) показало, что характер вертикальных скоростей Южно-Курильского пролива благоприятствует оседанию личинок, так как скорости там либо очень малы, либо направлены вниз.



**Рис. 4.** Результат моделирования поля вертикальных течений (осреднение по столбу воды) для акватории Южно-Курильского пролива

 – зона опускания вод,  – зона подъема вод

**Fig. 4.** A model-made field of vertical currents (average for a water column) for South-Kuril Strait

 – zone of water descending,  – zone of water ascending

В заливе Немуро средняя вертикальная скорость по толще воды не имеет ярко выраженной направленности, в то же время в придонном слое практически повсеместно происходит перенос личинок в более верхние слои, что способствует сносу личинок в сторону Южно-Курильского пролива – так, в поверхностном слое происходит снос со скоростью порядка 5 см/с.

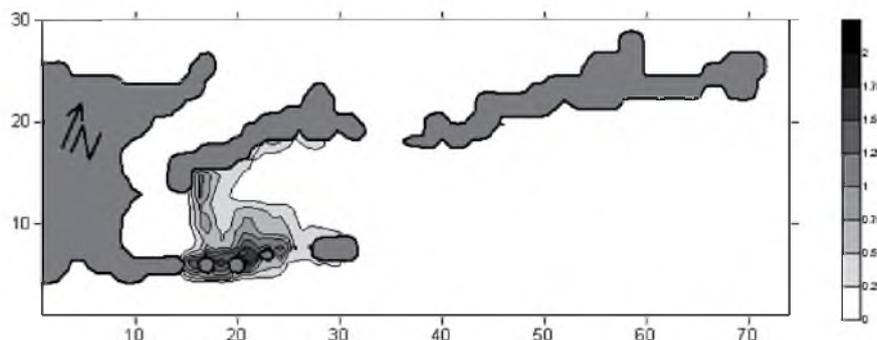
Расчет вертикальных скоростей в районе островов Малой Курильской гряды, как и следует из наличия циклонического вихря, показал опускание вод в этом районе, что должно благоприятствовать накоплению личинок в этом районе. Южные побережья Кунашира и Итурупа фрагментарно состоят из мест, благоприятствующих оседанию личинок, но в целом на этом отрезке акватории преобладают участки, пусть с невысокими, но все же направленными вверх вертикальными скоростями.

#### **Расчет распределения личинок колючего краба**

Изучение расчета мест наибольшей концентрации личинок колючего краба можно разделить на три стадии:

- определение мест скопления на основе начального распределения (см. рис. 4) по результатам натуральных съемок (Клитин, 2002);
- определение мест скопления при начальном равномерном распределении личинок на акватории, глубина которой не превышает 50 м;
- определение направления дрейфа личинок и мест скопления на основе расчетов переноса личинок как полупассивной примеси.

**Поле концентрации личинок, основанное на реальном начальном распределении.** Полученное распределение зоопланктона (рис. 5) показывает, что наибольшая средняя концентрация по столбу воды наблюдается в акватории островов Малой Курильской гряды. Также аккомодация зоопланктона наблюдается в заливе Немуро и вдоль южного побережья острова Кунашир. Отметим, что на акваториях с глубиной более 50 метров концентрация резко падает.



**Рис. 5.** Результат моделирования распределения личинок колючего краба в придонном слое для акватории Южно-Курильского пролива при начальном распределении, основанном на результатах натурных съемок

**Fig. 5.** A model-made distribution pattern of Hanasaki larvae in the near-bottom layer for South-Kuril Strait under the initial distribution based on the results of field surveys

Концентрация личинок в придонном слое дает следующую картину. Наибольшая концентрация наблюдается в трех местах: акватория островов Малой Курильской гряды (со смещением к северу), центральная часть южного побережья острова Кунашир и центральная часть Южно-Курильского пролива. Данный результат хорошо отражает картину распределения личинок краба в стадии зоэа 3, полученную СахНИРО в 2003 г.

Вычленение личинок краба из общего распределения зоопланктона показало, что модельное распределение неплохо описывает результат съемки, проведенной силами СахНИРО в 2006 г. А именно: высокая концентрация наблюдается в районе островов Малой Курильской гряды, со смещением к центру Южно-Курильского пролива, а фрагментарная группировка – на южном побережье острова Кунашир.

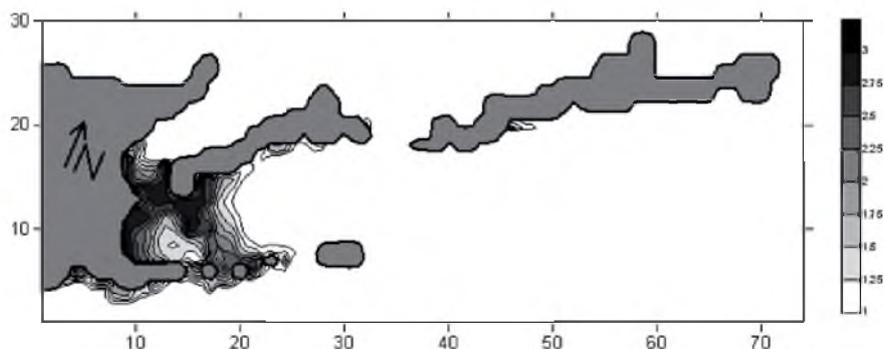
**Поле концентрации личинок при равномерном начальном распределении.** Расчет распределения личинок краба при их начальном равномерном распределении на акваториях с глубиной меньше 50 метров проводился с целью выявления локаций, где гидродинамические условия благоприятствуют устойчивости популяции краба.

Концентрация личинок в придонном слое представлена на рисунке 6. Выделяются места с наибольшей концентрацией: акватория островов Малой Курильской гряды, юго-западное побережье острова Кунашир, западная часть залива Немуро. Стоит отметить резкое падение концентрации личинок на выходе из залива Немуро, что может быть вызвано поднятием вод в этом районе.

**Поле концентрации личинок при рассмотрении их как полупассивной примеси.** Наблюдения за поведением личинок краба как за полупассивной примесью показали, что места наибольшего скопления наблюдаются у островов Малой Курильской гряды, в особенности у западного побережья Шикота-

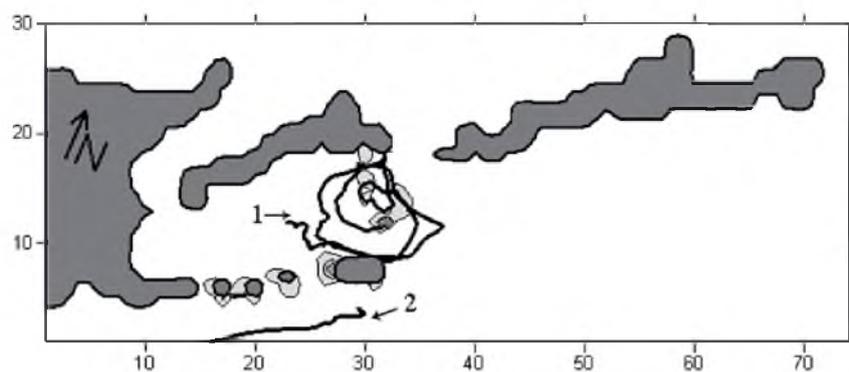
на. На **рисунке 7** показаны дрейфы некоторых личинок, которые можно охарактеризовать как:

- снос личинки течением Ойясио,
- «блуждание» личинки по Южно-Курильскому проливу и невозможность пересечения пролива Екатерины.



**Рис. 6.** Результат моделирования распределения личинок колючего краба в придонном слое для акватории Южно-Курильского пролива при равномерном начальном распределении личинок на акватории с глубиной на более 50 метров

**Fig. 6.** A model-made distribution pattern of Hanasaki larvae in the near-bottom layer for South-Kuril Strait under the even initial larval distribution on the area with depth not more than 50 m



**Рис. 7.** Расчетные дрейфы личинок колючего краба с выделением мест наибольшего скопления. Стрелками показаны начальные точки дрейфа и его дальнейшее направление. Траектория 1 – снос личинок с акватории Малой Курильской гряды в сторону Тихого океана. Траектория 2 – снос личинок с центральной части Южно-Курильского пролива к его северной границе и дальнейшее дрейфование вдоль нее

**Fig. 7.** Calculated drifts of Hanasaki larvae with distinguished places of maximal concentration. Arrows indicate start points of drift and further direction. Path 1 – larval drift from the area of Malaya Kurilskaya Gryada toward the Pacific Ocean. Path 2 – larval drift from the central part of the South-Kuril Strait toward its northern boundary and further drift along it

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За время проведения исследований первоначальная модель претерпела многочисленные изменения. Были введены различия времени суток, приливные течения, отсекались неинформативные участки акваторий, совершенствовалась методика описания поведения личинок в естественной среде. Со временем результаты экспериментов уточнялись, проводимые исследования

помогли точнее определить начальные условия моделирования и дали возможность сравнения модельных результатов с реальными данными.

При проведении численных экспериментов с использованием модельной сетки с размерами ячейки 5 000 метров полученные поля морских течений не противоречат ранее известным результатам, что позволяет сделать вывод о применимости Принстонской океанологической модели к расчету полей распределения гидродинамических величин в Южно-Курильском проливе и прилегающих к нему акваториях.

Анализируя зоны максимально возможного скопления краба, вне зависимости от вводимых в систему возмущений, можно выделить три акватории, благоприятствующие оседанию личинок:

- залив Немуро,
- острова малой Курильской гряды,
- центральная часть Южно-Курильского пролива.

Конечно, эти зоны условны и их размеры зависят от точности введенных в модель приближений, но одно можно сказать уверенно, что именно эти акватории аккумулировали наибольшую часть осаждаемых личинок.

Отметим, что полученные результаты должны рассматриваться критически и нуждаются в уточнении (например, была выведена из рассмотрения пригодность поверхности дна для оседания). Однако, на наш взгляд, эксперимент наглядно демонстрирует возможность применения эколого-физической модели для прогнозирования распространения и изменения концентраций личинок краба, что, в свою очередь, может служить основой для прогноза численности популяции.

## ЛИТЕРАТУРА

- Богданов, К. Т. Воды Курило-Камчатского течения и течения Ойясио [Текст] / **К. Т. Богданов, В. В. Мороз**. – Владивосток : Дальнаука, 2004. – 138 с.
- Гидрометеорология** и гидрохимия морей. Том VIII Японское море. Вып. 1 Гидрометеорологические условия [Текст]. – СПб. : Гидрометеоиздат, 2003. – 399 с.
- Иванов, А.** Введение в океанографию [Текст] / А. Иванов. – М. : Мир, 1978. – 575 с.
- Клитин, А. К.** О распределении личинок промысловых крабов у Южных Курильских островов в 1998 и 1999 гг. [Текст] / А. К. Клитин // Изв. ТИНРО. – 2002. – Т. 131. – С. 266–283.
- Кондратьев, К. Я. Радиационный режим наклонных поверхностей [Текст] / **К. Я. Кондратьев, З. И. Пивоварова, М. П. Федорова**. – Л. : Гидрометеоиздат, 1978. – 215 с.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР** [Текст]. Сер. 3, ч. 1–6, вып. 34 Сахалинская область. – Л. : Гидрометеоиздат, 2003. – 352 с.
- Никонов, Ю. Ю. Применение принстонской океанологической модели (ПОМ) для численного анализа распространения личинок колочего краба (*Paralithodes brevipes*) в районе Южно-Курильского пролива [Текст] / **Ю. Ю. Никонов, А. С. Красненко** // Тр. СахНИРО. – 2006. – Т. 8. – С. 257–266.
- Ezer, T. Sensitivity studies with the North Atlantic sigma coordinate Princeton Ocean Model [Text] / **T. Ezer, G. L. Mellor** // Dynamics of Atmospheres and Oceans. – 2000. – Vol. 32. – P. 185–208.
- An ecological-physical coupled model applied to station Papa [Text] / **M. Kawamiya, M. J. Kishi, Y. Yamanaka, N. Sugimoto** // J. Oceanogr. – 1995. – Vol. 51. – P. 635–664.
- Liu, J. T. Numerical modeling study of sediment dispersal by a river plume [Text] / **J. T. Liu, S.-Yu Chao, R. T. Hsu** // Continental Shelf Research. – 2002. – Vol. 22. – P. 1745–1773.
- Mellor, G. L.** Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model [Text] / G. L. Mellor. – 2004. – 56 p.
- Oshima, Y. Evaluation of the nutrient budget in a seagrass bed. Ecological Modelling [Text] / **Y. Oshima, M. J. Kishi, T. Sugimoto**. – 1999. – Vol. 115. – P. 19–33.