

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНСТОНСКОЙ ОКЕАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛИЧИНОК КОЛЮЧЕГО КРАБА (*PARALITHODES BREVIPES*) В РАЙОНЕ ЮЖНО-КУРИЛЬСКОГО ПРОЛИВА

Ю. Ю. Никонов¹, А. С. Красненко²

¹ Сахалинский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (Южно-Сахалинск); ² Университет Хоккайдо (Саппоро)

ВВЕДЕНИЕ

Одним из подходов к пониманию процесса размножения крабов является анализ пространственного распределения плотности скопления личинок. Натурные эксперименты, как правило, проводятся редко, что делает сложным наблюдение за краткосрочными динамическими процессами связанных, например, с перераспределением скоплений личинок различных стадий. С другой стороны, район Южно-Курильского пролива отличается сложным гидродинамическим режимом, что затрудняет прогностическое описание поведения водных масс для последующего анализа распределения личинок колючего краба. В то же время принципы численного моделирования 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. Таким образом, целью данной работы является проверка возможности применения численных методов для выявления мест наиболее вероятного скопления личинок колючего краба, находящихся в зоопланктонной стадии.

Для проведения эксперимента была выбрана и адаптирована к физико-географическим условиям акватории Южных Курильских островов широко используемая в настоящее время трехмерная гидродинамическая Принстонская океаническая модель (Princeton Ocean Model – POM) (Mellor, 2004).

Описание физической части модели

Численный эксперимент был поставлен для прямоугольного участка акватории, ограниченного координатами 43°00' с. ш., 145°00' в. д. и 44°45' с. ш., 147°00' в. д. Рельеф дна показан на рисунке 1.

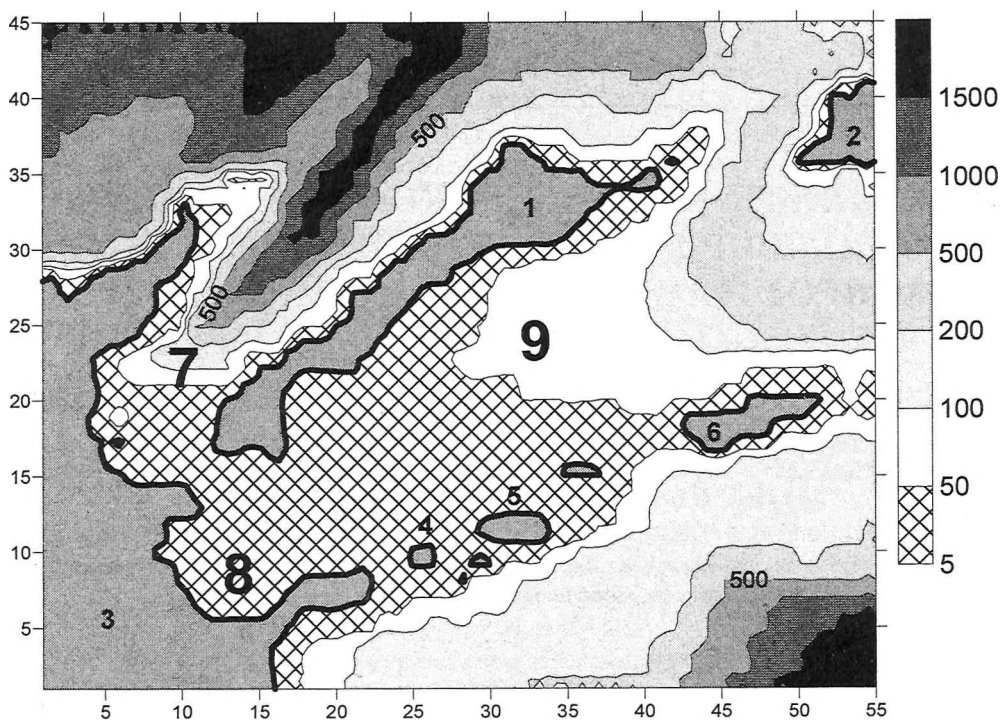



Рис. 1. Распределение глубин акватории южных Курильских островов: 1 – о. Кунашир; 2 – о. Итуруп; 3 – о. Хоккайдо; 4 – о. Танфильева; 5 – о. Зеленый; 6 – о. Шикотан; 7 – Кунаширский пролив; 8 – залив Немуро; 9 – Южно-Курильский пролив;  – начальное распределение личинок колючего краба

При моделировании применялась равномерная сетка размером 55×45 с линейным размером квадратной ячейки 3000 метров. По вертикали использовались четыре равнопропорциональных слоя (пропорция 1:1:1:1). При этом на самом мелком участке акватории толщина одного слоя составляла 2,5 метра, на самом глубоком – 450 метров. Вычисления проводились в трехмерном прогностическом режиме, время моделирования – 30 суток. Данный параметр выбран как наиболее вероятное время перехода личинки на стадию зоэа II. Временной шаг внешней моды был выбран 1 сек., внутренней – 30 сек.

Реализованный в РОМ алгоритм предусматривает следующие граничные условия. В поверхностном слое вертикальная скорость воды была принята за ноль. Горизонтальная скорость перемещения водных масс зависела от ветра на поверхности. На дне было задано условие твердого дна, что соответствовало отсутствию вертикальной компоненты скорости перемещения водных масс у дна. На твердой границе задавалось условие отсутствия нормальной к берегу компоненты скорости; также на данной границе задавалось условие отсутствия потоков тепла и соли.

Моделирование проводилось при типичных атмосферных условиях данного района для конца апреля – начала мая. Данное время года было выбрано в качестве начального момента моделирования, так как является типичным для массового выхода личинок колючего краба в планктон. Атмосферные характеристики были выбраны постоянными на всем протяжении моделирования и были приняты за:

- атмосферное давление – 1,010 МПа;
- температура воздуха – 5,2°C;
- влажность – 70%;
- облачность – 0,5;
- ветер юго-западный, скорость 1 м/с;
- солнечная радиация – 0,8 калорий/см² в минуту (Научно-прикладной..., 1990).

Начальное распределение температуры и солености показано на рисунке 2.

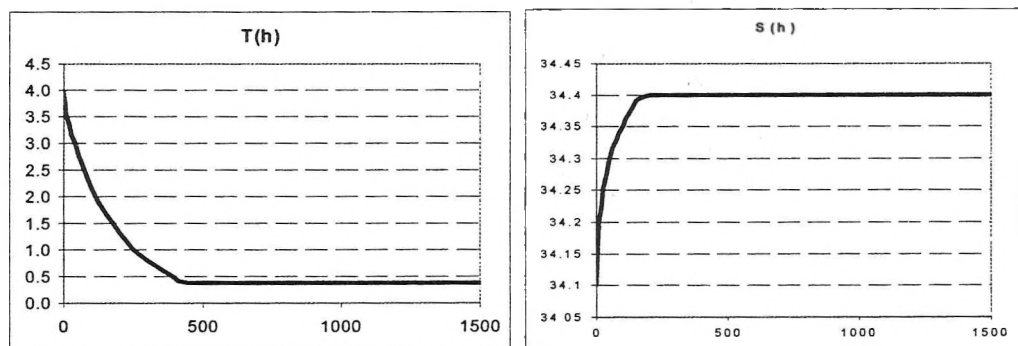


Рис. 2. Начальное вертикальное распределение температуры $T(h)$ и солености $S(h)$

Описание биологической части модели

Алгоритм биологической части модели был построен на основе алгоритма эколого-физической модели для станции PAPA-KKYS (Kawamiya et al., 1995). Для расширенного описания происходящих процессов биологическая часть модели была дополнена циклом, включающим в себя процессы, использующие фосфор. При этом по аналогии с KKYS-моделью для экосистемы Аккеси (Иванов, 1978; Oshima et al., 1999) были введены следующие процессы:

- расход фосфатов при фотосинтезе;
- выделение фосфатов фитопланктоном и зоопланктоном;
- растворение взвешенных фосфатов;
- осаждение фосфатов на дно;
- разложение донных осадков с выделением фосфатов;
- разложение взвешенных и нерастворенных органических фосфатов.

Основные параметры уравнений биологической модели в большинстве аналогичны параметрам KKYS-модели.

В представленной модели личинки краба вводились как дополнительная концентрация зоопланктона, причем при моделировании дневные вертикальные миграции личинок не учитывались. Сухая масса личинки принималась за 0,11 мг (Ковачева и др., 2004). Рассматривались два возможных варианта распределения личинок в вертикальном столбе воды:

- равномерное распределение;
- смешанное распределение (2/3 всех личинок располагается в придонном слое, остальная часть личинок равномерно распределена в слоях, расположенных выше).

Местами начального распространения личинок краба считалась акватория с глубинами, не превышающими 50 метров (границы акватории указаны на рисунке 1). Взаимодействия зоопланктона с другими компонентами биологической модели показаны на рисунке 3 (азотный и фосфорный циклы).

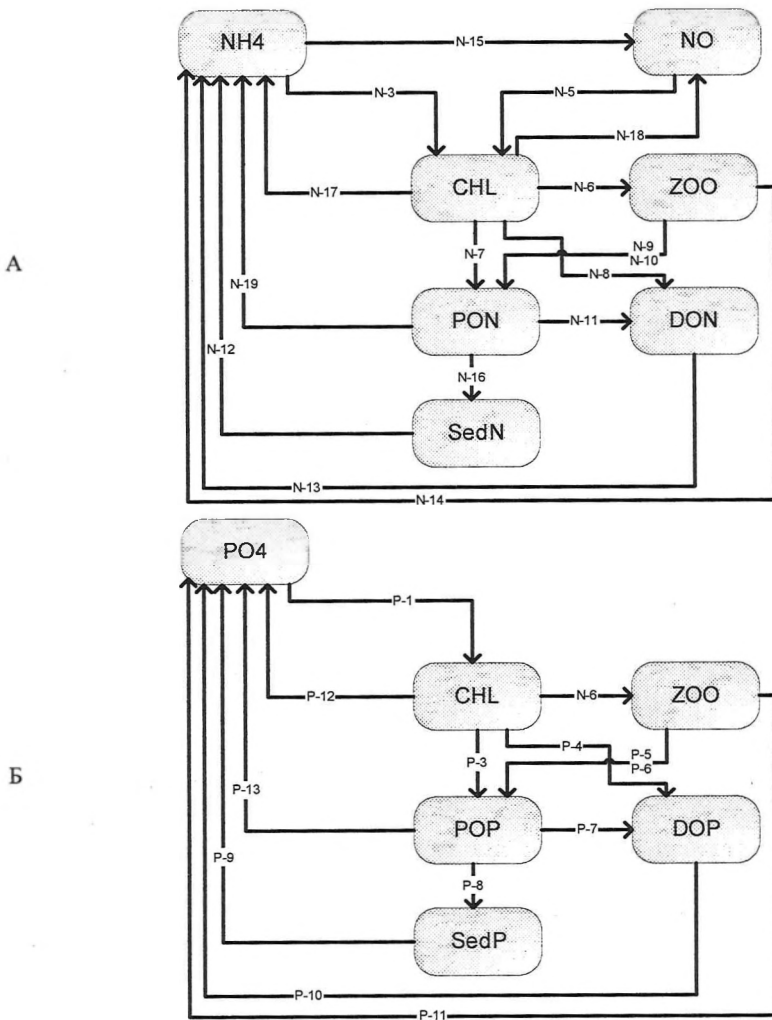


Рис. 3. Взаимодействие компонент биологической модели по: Иванов, 1978; Kawatiya et al., 1995; Oshima et al., 1999 (А – цикл азота, Б – цикл фосфора): CHL – фитопланктон; ZOO – зоопланктон; NO – нитраты и нитриты; NH4 – аммиак; DON – растворенный органический азот; PON – взвешенный органический азот; PO – фосфаты; POP – растворенный органический фосфор; DOP – взвешенный органический фосфор; SedN – азот в донных осадках; SedP – фосфаты в донных осадках

Поставленная задача состояла в том, чтобы показать возможное перераспределение личинок колючего краба с учетом их биологических процессов в зоопланктонной стадии. Процесс изменения биомассы личинок колючего краба (Δ_{ZOO}) можно записать следующим образом:

$$\Delta_{ZOO} = F_{ph} + F_{eco},$$

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).

Математическое описание взаимодействий биологической модели с участием зоопланктона представлены в таблице 1 (номера процессов даны в соответствии с обозначениями, указанными на рисунке 3; знак в скобках показывает направление изменения биомассы зоопланктона).

Таблица 1

Математическое описание взаимодействий зоопланктона с другими биологическими компонентами модели

Обозначение на схеме	Математическое описание процесса
	$R_{N \rightarrow C}^{CHL} = 0,146$, $R_{P \rightarrow N}^{CHL} = 0,0645$ – коэффициенты разложения для фитопланктона, $R_{N \rightarrow C}^{ZOO} = 0,132$, $R_{P \rightarrow N}^{ZOO} = 0,0294$ – коэффициенты разложения для зоопланктона, ZOO – концентрация зоопланктона.
N-6 (+)	Питание зоопланктона фитопланктоном (повышение биомассы) $\Delta = ZOO \cdot GRMAX \cdot e^{RKG \cdot T} \cdot (1 - e^{RLAMB(ZS - CHL)})$, $GRMAX=0,03$ [1/сутки] – коэффициент выедания при 0°C, $RKG=0,0693$ [1/°C] – температурный коэффициент, $RLAMB=0,745$ [1/мкг Chl] – постоянная Ивлева, $ZS=0,081$ [мкг Chl/l] – пороговый уровень питания.
N-9 (-)	Смертность зоопланктона и разложение в PON $\Delta = (ZOO^2 \cdot RMZO \cdot e^{RKMZ \cdot T}) \cdot R_{N \rightarrow C}^{ZOO}$, $RMZO=0,0585$ [1/сутки] – смертность при 0°C, $RKMZ=0,0693$ [1/°C] – температурный коэффициент.
N-10 (-)	Выделение зоопланктоном непереваренного PON $\Delta = (1 - \alpha) \cdot \Delta_{N-6} \cdot R_{N \rightarrow C}^{CHL}$, $\alpha=0,7$ – эффективность усвоения пищи.
N-14 (-)	Распад с выделением NH4 (выдыхание) $\Delta = (\alpha - \beta) \cdot \Delta_{N-6} \cdot R_{N \rightarrow C}^{CHL}$, $\alpha=0,7$ – эффективность усвоения пищи, $\beta=0,3$ – эффективность роста.
P-5 (-)	Смертность зоопланктона и разложение в POP $\Delta = (ZOO^2 \cdot RMZO \cdot e^{RKMZ \cdot T}) \cdot R_{N \rightarrow C}^{ZOO} \cdot R_{P \rightarrow N}^{ZOO}$, $RMZO=0,0585$ [1/сутки] – смертность при 0°C, $RKMZ=0,0693$ [1/°C] – температурный коэффициент.
P-6 (-)	Выделение зоопланктоном непереваренного POP $\Delta = (1 - \alpha) \cdot \Delta_{N-6} \cdot R_{N \rightarrow C}^{CHL} \cdot R_{P \rightarrow N}^{CHL}$, $\alpha = 0,7$ – эффективность усвоения пищи.

Начальные распределения биологических компонентов модели соответствуют апрельским среднегодовым значениям в рассматриваемом регионе и представлены в таблице 2.

Начальные условия биологических компонентов

Биологические компоненты	Значение	Размерность
Нитраты и нитриты (NO)	60,7	мкМоль N/литр (Леонов, Сапожников, 1997)
Аммиак (NH ₄)	1,21	мкМоль N/литр (Леонов, Сапожников, 1997)
Растворенный органический азот (DON)	10,9	мкМоль N/литр (Леонов, Сапожников, 1997)
Взвешенный органический азот (PON)	3,57	мкМоль N/литр (Леонов, Сапожников, 1997)
Фосфаты (PO)	0,4 (если H<20 м) 1 (если H≥20 м)	мкМоль P/литр (Пищальник, Бобков, 2002)
Растворенный органический фосфор (DOP)	0,96	мкМоль P/литр (Леонов, Сапожников, 1997)
Взвешенный органический фосфор (POP)	1,61	мкМоль P/литр (Леонов, Сапожников, 1997)
Фитопланктон	7	мкг/литр (Вентцель, 1997)
Зоопланктон	0,515	мкМоль C/литр (Найденко, 2002)
Личинки краба	690,85	мг/м ² (Клитин, 2002)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование гидродинамических параметров показало следующее. В пространственном распределении поверхностных течений (рис. 4) можно выделить антициклонический вихрь в южной части Южно-Курильского пролива (характерные скорости до 3 см/с), который на входе в залив Немуро компенсируется течением, распространяющимся вдоль берегов восточного побережья Хоккайдо (до 6 см/с). В северной части пролива наблюдается циклонический вихрь (до 3 см/с), захватывающий на периферии акваторию островов Малой Курильской гряды. Наибольшие скорости наблюдаются на севере Кунаширского пролива и в проливе Екатерины. В придонном слое наблюдается антициклонический вихрь (скорость до 2 см/с), направляющий воды с океанской стороны островов Малой Курильской гряды в Южно-Курильский пролив, что приводит к затоку донных вод в залив Немуро и ослаблению течений между островами Малой Курильской гряды (см. рис. 4). В северной части рассматриваемого региона наблюдается возникновение течения вдоль охотоморской стороны острова Кунашир, которое впоследствии раздваивается у острова Итуруп. Высокие придонные скорости (до 6 см/с) в районе свала глубин объясняются выбранным масштабом модельной сетки, что приводит к нарушению условия малости вертикального градиента глубин по отношению к горизонтальному масштабу сетки.

Расчитанное распределение средней по вертикали концентрации личинок колючего краба при начальном равномерном их распределении показано на рисунке 5. Снижение биомассы наблюдается в северной части Южно-Курильского пролива, что может объясняться характером течений в этом районе, которые во всех слоях имеют южные румбы, способствуя переносу личи-

нок в южную часть пролива. Значительное увеличение биомассы отмечается в акватории Кунаширского пролива. В то же время придонное распределение личинок колючего краба (см. рис. 5) показывает, что поля высокой концентрации личинок гораздо шире. К уже описанным районам можно добавить северную и южную часть залива Немуро, а также зону между островами Кунашир и Танфильева.

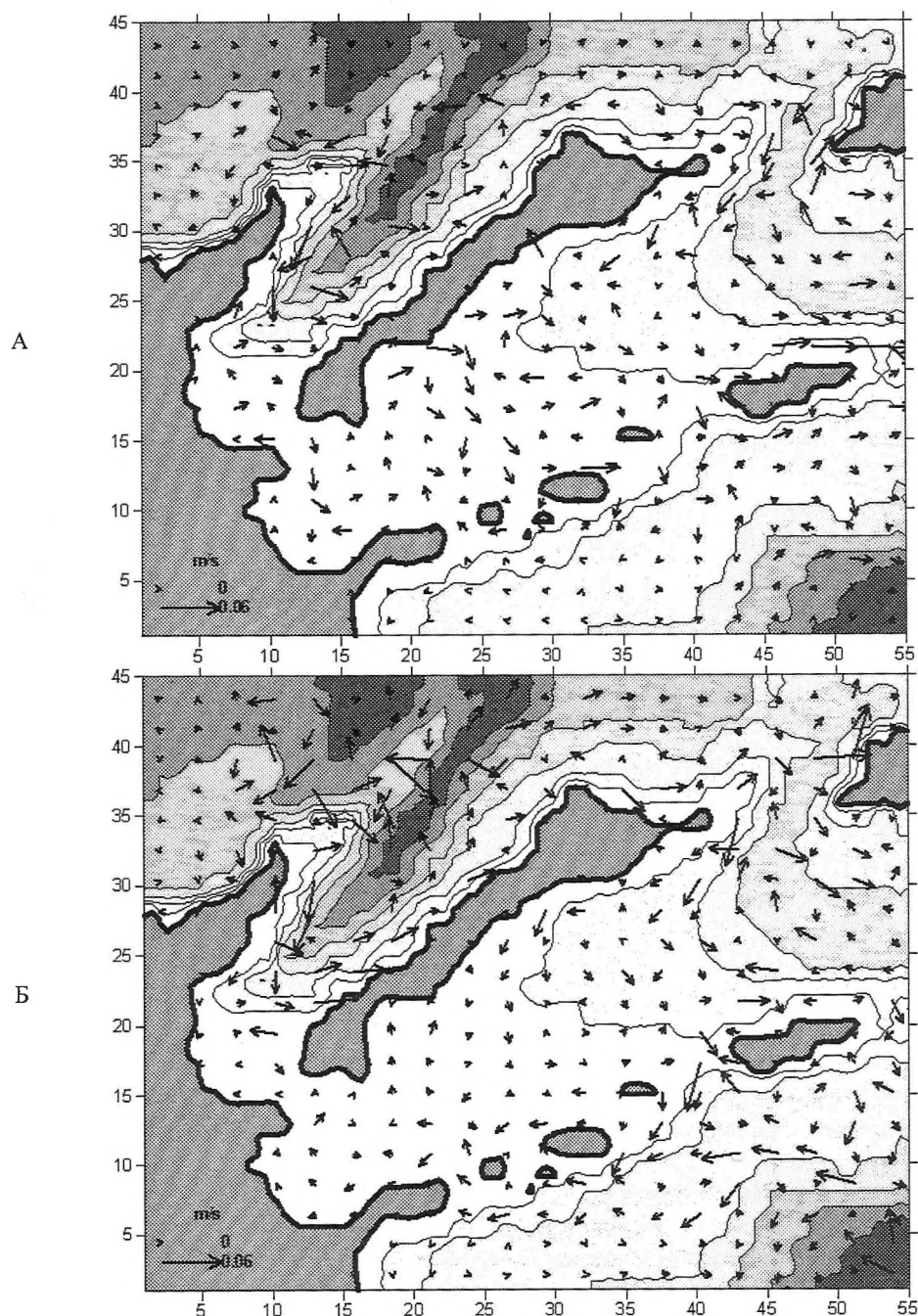


Рис. 4. Карта поверхностных (А) и донных (Б) течений. Время моделирования – 30 суток

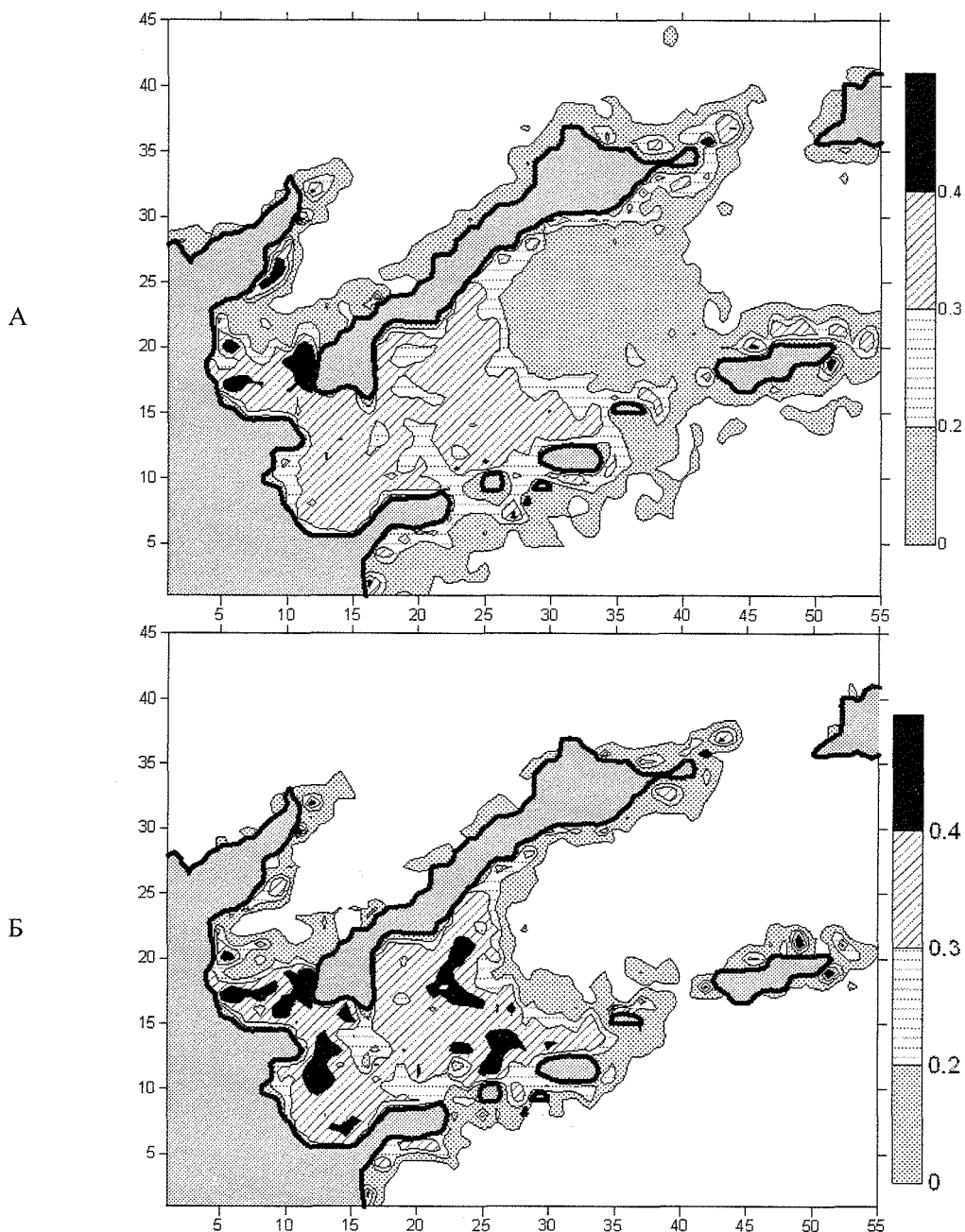


Рис. 5. Средняя (А) и придонная (Б) концентрации личинок колючего краба при их начальном равномерном распределении [мкМоль С/литр]

Пространственное распределение личинок колючего краба при их смешанном распределении было получено аналогичным образом. Средняя по вертикали концентрация личинок колючего краба в водяном столбе показана на рисунке 6. Уменьшение биомассы наблюдается, как и в предыдущем случае, в северной части Южно-Курильского пролива. Произошло увеличение площадей участков со значительной концентрацией биомассы личинок. В данном случае они

занимают большую часть акваторий Кунаширского пролива, залива Немуро, а также центральную часть Южно-Курильского пролива. Придонная концентрация личинок колючего краба (см. рис. 6), как и в предыдущем случае, находится на высоком уровне на более обширных территориях. Данные территории распространяются практически на всю центральную и южную часть Кунаширского пролива с захватом акватории залива Немуро, а также широкую зону между островами Кунашир и Танфильева.

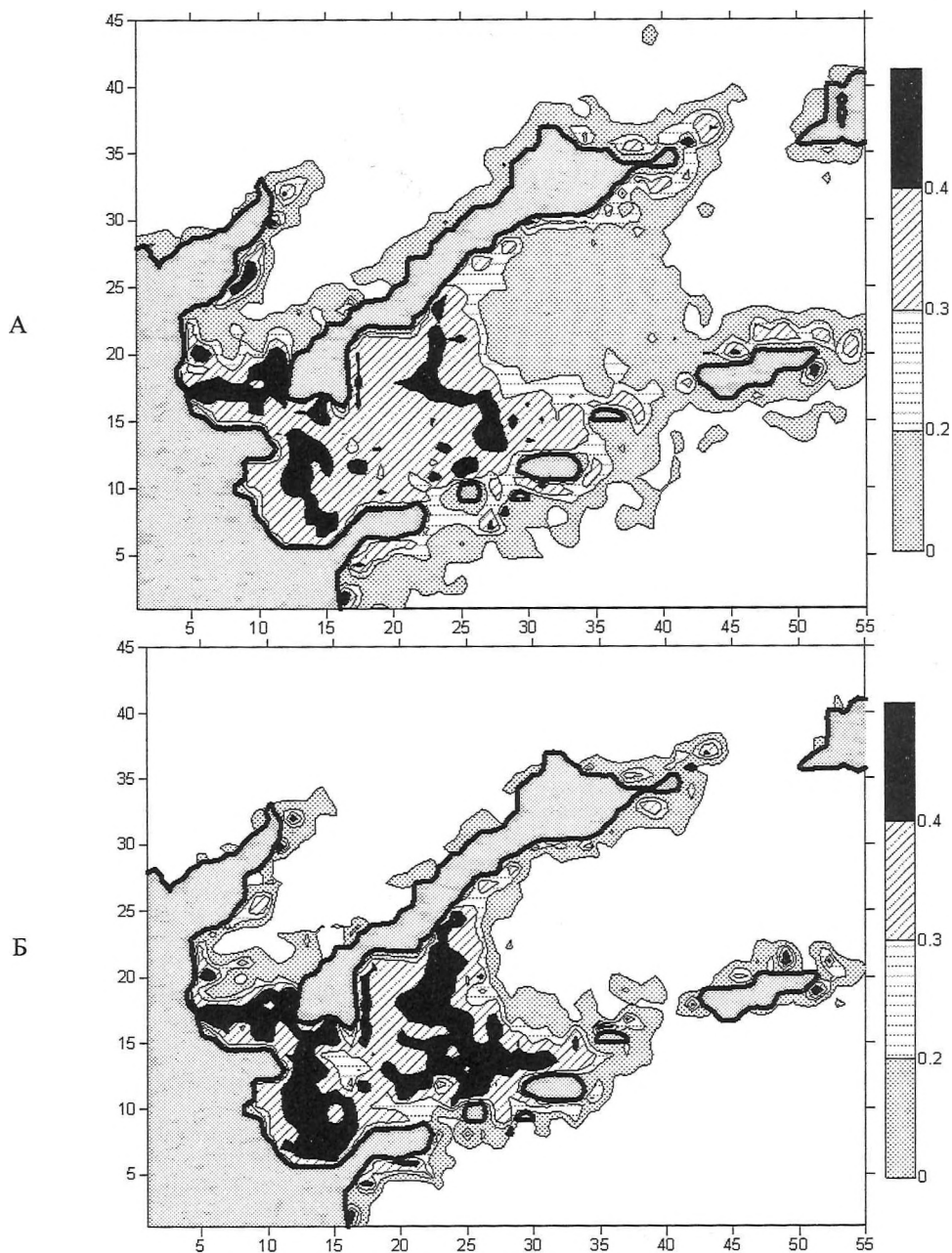


Рис. 6. Средняя (А) и придонная (Б) концентрации личинок колючего краба при их начальном смешанном распределении [мкмоль С/литр]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ поверхностных течений показал выраженный занос вод в залив Немуро со стороны Южно-Курильского и Кунаширского проливов, что обуславливает высокую концентрацию личинок колючего краба при двух вариантах задания начальных условий их распределения. Столкновение течения вдоль восточного побережья Хоккайдо с течениями южной части Южно-Курильского пролива приводит к уменьшению характерных скоростей, что способствует накоплению на данной территории личинок колючего краба. Неинтенсивный обмен вод Южно-Курильского пролива и Тихого океана в районе островов Танфильева и Зеленый приводит к повышению концентрации личинок на акватории, расположенной севернее этих островов. В целом, тенденции, полученные в определении наиболее вероятных мест скопления личинок при их начальном смешанном распределении, только в общих чертах отражают реальное распределение концентраций личинок в районе островов Малой Курильской гряды и центра Южно-Курильского пролива (Клитин, 2002). Данное обстоятельство, с одной стороны, связано с недостаточностью информации о питании, интенсивности роста и выживаемости личинок колючего краба в природных условиях. С другой стороны, океанологическая часть модели не учитывает некоторые особенности рассматриваемого региона (например, приливные течения). В связи с этим полученные результаты, безусловно, должны рассматриваться критически и нуждаются в уточнении. 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 существенным дополнением при оценке пополнения популяции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель, М. В. Фитопланктон Охотского моря зимой и в начале весны 1990 г. / М. В. Вентцель // Комплекс. исслед. экосистемы Охотского моря. – М. : Изд-во ВНИРО, 1997. – С. 205–209.
2. Иванов, А. Введение в океанографию / А. Иванов. – М. : Мир, 1978. – 576 с.
3. Клитин, А. К. О распределении личинок промысловых крабов у Южных Курильских островов в 1998 и 1999 гг. / А. К. Клитин // Изв. ТИНРО-центра. – 2002. – Т. 131. – С. 266–283.
4. Ковачева, Н. П. Личиночное развитие камчатского краба *Paralithodes camtschaticus* (Tilesius, 1815) при искусственном культивировании / Н. П. Ковачева, А. Б. Эпельбаум, А. В. Калинин // Проблемы репродукции и раннего онтогенеза мор. гидробионтов : Тез. докл. междунар. науч. семинара (Мурманск, 2–4 нояб. 2004 г.). – Мурманск, 2004. – С. 56–59.
5. Леонов, А. В. Биогидрохимическая модель трансформации органогенных веществ и ее использование для расчета первичной продукции в экосистеме Охотского моря / А. В. Леонов, В. В. Сапожников // Комплекс. исслед. экосистемы Охотского моря. – М. : Изд-во ВНИРО, 1997. – С. 143–166.
6. Найдено, С. В. Состав, динамика биомассы и потребление зоопланктона в эпипелагиали Южно-Курильского района в 1990-е годы / С. В. Найдено // Биология моря. – 2002. – Т. 28, № 4. – С. 272–278.
7. Научно-прикладной справочник по климату СССР. – Л. : Гидрометеоздат, 1990. – Сер. 3 Многолетние данные, ч. 1–6, вып. 34 Сах. обл. – 351 с.
8. Пищальник, В. М. Океанографический атлас шельфовой зоны острова Сахалин / В. М. Пищальник, А. О. Бобков. – Ю-Сах. : Изд-во СахГУ, 2002. – Ч. II. – 108 с.
9. An ecological-physical coupled model applied to station Papa / M. Kawamiya, M. J. Kishi, Y. Yamanaka, N. Sugino-hara // J. Oceanogr. – 1995. – Vol. 51. – P. 635–664.
10. Mellor, G. L. Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model / G. L. Mellor. – 2004. – 56 p.
11. Oshima, Y. Evaluation of the nutrient budget in a seagrass bed / Y. Oshima, M. J. Kishi, T. Sugimoto // Ecological Modeling. – 1999. – Vol. 115. – P. 19–33.

Никонов, Ю. Ю. Применение Принстонской океанической модели для численного расчета распространения личинок колючего краба (*Paralithodes brevipes*) в районе Южно-Курильского пролива / Ю. Ю. Никонов, А. С. Красненко // Биология, состояние запасов и условия обитания гидробионтов в Сахалино-Курильском регионе и сопредельных акваториях : Труды Сахалинского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. – Южно-Сахалинск : СахНИРО, 2006. – Т. 8. – С. 257–266.

В статье рассмотрены вопросы возможности применения численной трехмерной гидродинамической Принстонской океанической модели (ПОМ) для определения мест наиболее вероятного скопления личинок колючего краба (*Paralithodes brevipes*) в акватории Южных Курильских островов. Эксперимент проводился при условиях, типичных для данного района в начале мая, так как данный промежуток времени характерен для массового выхода личинок колючего краба в планктон.

С помощью численных расчетов показано наличие антициклонического вихря в южной части Южно-Курильского пролива. Наибольшая концентрация личинок колючего краба в российских территориальных водах отмечалась в центральной части Южно-Курильского пролива, что хорошо согласуется с натурными исследованиями.

Nikonov, Yu. Yu. Applying the Princeton Oceanic Model to calculate a distribution of the hanasaki crab (*Paralithodes brevipes*) larvae in the South-Kuril Strait / **Yu. Yu. Nikonov, A. S. Krasnenko** // Water life biology, resources status and condition of inhabitation in Sakhalin-Kuril region and adjoining water areas : Transactions of the Sakhalin Research Institute of Fisheries and Oceanography. – Yuzhno-Sakhalinsk : SakhNIRO, 2006. – Vol. 8. – P. 257–266.

Some questions of possible applying the numerical three-dimensional hydrodynamic Princeton Oceanic Model (POM) to determine the areas of the most probable aggregation of the hanasaki crab (*Paralithodes brevipes*) larvae on the area of southern Kuril Islands are considered. The experiment was performed under the conditions typical for this region in early May, because this time period is common for the *Paralithodes brevipes* larvae mass emerging to the plankton.

The calculations show that there is an anticyclonic eddy in the southern part of the South-Kuril Strait. The maximum concentration of the *Paralithodes brevipes* larvae in Russian territorial waters was recorded in the central part of the South-Kuril Strait that is well agreed with the on-site observations.

Tabl. – 2, fig. – 6, ref. – 11.