

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД В ЗАЛИВЕ АНИВА ПО ДАННЫМ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ 26–31 МАЯ 2004 ГОДА

Ю. Ю. Никонов

Сахалинский научно-исследовательский институт
рыбного хозяйства и океанографии (Южно-Сахалинск)

ВВЕДЕНИЕ

Залив Анива расположен на юге острова Сахалин и имеет полузамкнутую форму с открытой границей на юге залива. Максимальная глубина на его акватории достигает 110 м. Данный залив, имея сравнительно небольшие размеры, играет важную роль в экономике острова, так как в его водах добывается значительное количество биоресурсов – таких, как горбуша, морской гребешок, морской еж и т. п.

Планируемая активизация эксплуатации промышленных объектов, располагающихся в непосредственной близости от береговой линии залива (например, завода по сжижению природного газа, порта Корсаков), привела к актуализации вопроса о влиянии деятельности человека на экосистему залива. Одной из важных задач при оценке возможного внешнего воздействия на условия обитания рыб и других гидробионтов является расчет распространения загрязняющих веществ, возникающего при возможных аварийных ситуациях, сбросах грунтов в воды залива и т. д. Для решения подобных задач необходимо знать характеристики морских течений в изучаемом районе.

Анализ общей циркуляции вод в заливе Анива представлен в работах (Будаева и др., 1980; Budaeva, Makarov, 1996; Пищальник, Архипкин, 1999). Согласно работам (Будаева и др., 1980; Budaeva, Makarov, 1996), применение численных расчетов, основанных на диагностической модели обработки плотностных полей, показало сезонный характер режима течений в заливе Анива. В западной части залива (район мыса Крильон) в весенне-летний период наблюдается слабовыраженный циклонический вихрь, переносящий воды со скоростями от 5 до 20 см/с. В центральной части залива наблюдается вихрь, направление вращения которого сезонно: в весенний, осенний сезоны – циклоническое, летний – антициклоническое. Скорость переноса водных масс на севере залива колеблется в пределах 3–15 см/с. Скорость течений в вихре, расположенном в центральной части южной границы залива, растет в течение года и меняется от 5–10 см/с (весной) до 20–25 см/с (осенью).

При проведении численных экспериментов с использованием линейной квазигеографической диагностической модели (Пищальник, Архипкин, 1999) были обработаны данные за период 1948–1994 гг. Представленная в работе схема течений сезонно устойчива. В западной части залива располагается северо-западный сектор циклонического вихря. Скорость течений в нем возрастает от 17 см/с (весной) до 23 см/с (осенью). Примерно посередине южной границы залива наблюдается центр антициклонического вихря, который охватывает значительную часть акватории залива Анива. Перемещение водных масс в данном вихре происходит со скоростью 6–10 см/с (весной) до 10–15 см/с (осенью). Наибольший модуль скорости наблюдается весной в восточной части вихря; летом, осенью – в западной.

Вышеописанные математические модели в качестве начальных данных использовали сезонные среднемноголетние данные, тем самым косвенно учитывая изменения ветра. В то же время встречаются задачи прогнозирования поля течений (например, расчет разноса в акватории нефтепродуктов) с учетом направления и скорости господствующего в конкретный момент времени ветра. Одним из недостатков диагностической модели является ее плохая приспособленность к мелководным участкам акватории, что, учитывая шельфовый характер дна залива, побудило нас к поиску математической модели, свободной от этого недостатка. В связи с чем целью настоящей работы является применение прогностической гидродинамической модели, использующей начальное распределение температуры и солёности, к расчету полей течений для последующего его использования при расчете поведения пассивных химических и биологических примесей (например, фосфатов, нитритов, фито- и зоопланктона и т. п.).

Для проведения численных экспериментов была выбрана трехмерная принстонская океанологическая модель (Princeton Ocean Model) (Ezer, Mellor, 2000). Из положительных особенностей данной модели можно выделить:

1. введение новой вертикальной σ -координаты (Mellor et al., 1998), позволяющее масштабировать толщину модельных слоев воды в зависимости от глубины в конкретной точке, при этом аккуратно описываются вертикальные структуры расчетных полей;

2. использование разных шагов по времени в баротропной и бароклинной модах при расчете быстроизменяющихся величин (скорости течений, полей распределения плотности, температуры и т. д.) и для определения медленно изменяющихся величин (вертикальные интегралы скоростей, уровень свободной поверхности моря и т. д.).

Данная модель показала свою состоятельность при проведении численного моделирования прибрежных вод юго-запада о. Тайвань (Liu et al., 2002), залива Уинья (Южная Каролина, США) (Goni et al., 2003), эстуарной системы Пил-Харвей (Австралия) (Hearn, Robson, 2002). Вышеперечисленное позволяет надеяться на удовлетворительное описание характера циркуляции водных масс в заливе Анива.

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Размеры залива Анива позволили при проведении численного эксперимента моделировать на прямоугольном участке β -плоскости (рис. 1), ограниченном координатами 142°5'4" в. д., 45°53'35" с. ш. и 143°25'8" в. д., 46°01'5" с. ш. Стороны прямоугольника имели ориентацию по сторонам света: ось абсцисс была направлена вдоль линии восток–запад, ось ординат – юг–север. Используемая модельная сетка имела 67×60 ячеек, имеющих форму квадрата со стороной 2700 м.

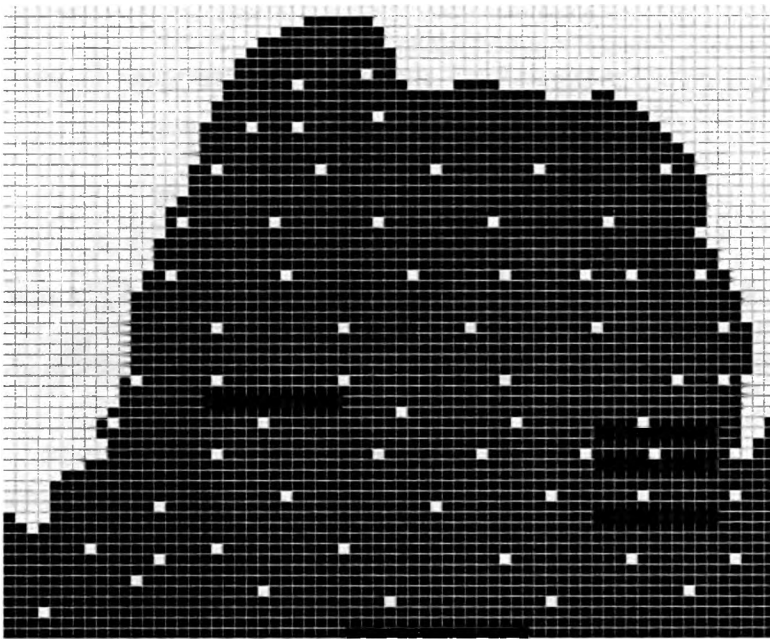
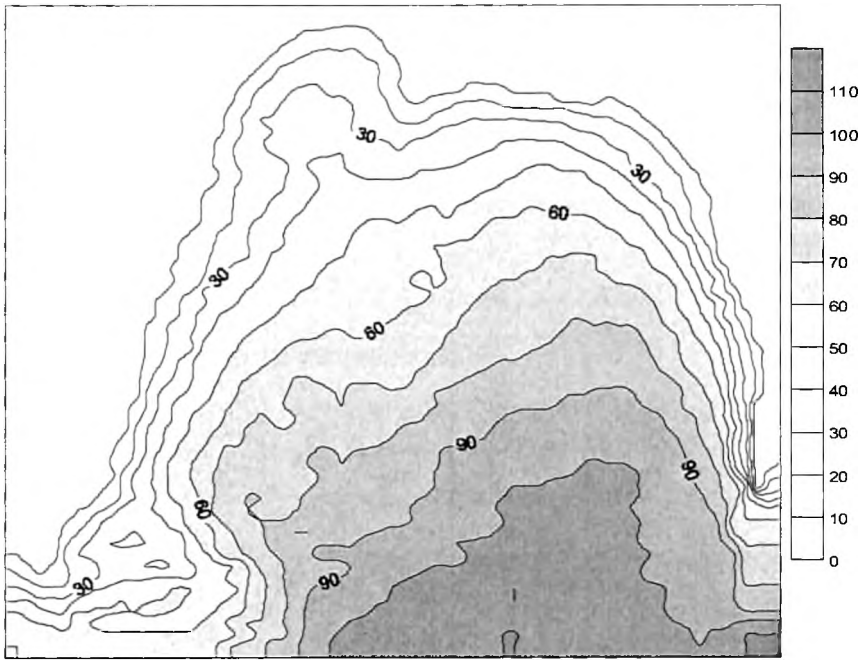


Рис. 1. Батиметрия залива Анива (сверху) и модельная сетка 67×60 (снизу) с нанесенной схемой CTD-станций

По вертикали применялась восьмислойная модель жидкости, толщина слоев определялась пропорцией 1:1:1:3:5:10:20:20. Шаг по времени баротропной моды был выбран 3 сек., бароклиной – 90 сек. При моделировании использовались уравнения движения, уравнение свободной поверхности, неразрывности, уравнения баланса температуры, переноса солей (Mellor, 2004).

Расчет движения водных массивов происходил с учетом турбулентной вязкости, горизонтальные компоненты которой (F_x и F_y) определялись по следующим формулам:

$$F_x = 2 \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(H \cdot A_M \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H \cdot A_M \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right),$$

$$F_y = 2 \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(H \cdot A_M \cdot \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(H \cdot A_M \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right),$$

где $A_M = 0.2 \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2}$ – переменный

коэффициент горизонтального турбулентного обмена; U, V – компоненты скорости течения в горизонтальной плоскости.

Горизонтальная турбулентная диффузия температуры (T), солёности (S) рассчитывалась следующим образом:

$$F_\phi = \frac{\partial}{\partial x} \left(H \cdot A_H \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H \cdot A_H \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} \right),$$

где ϕ – T, S . Коэффициент A_H аналогичен коэффициенту A_M , и при проводимых численных экспериментах выполнялось равенство $A_H = A_M$.

Расчет вертикальных коэффициентов турбулентных вязкости (K_M) и диффузии (K_H) проводился согласно:

$$K_M = ql \cdot S_M,$$

$$K_H = ql \cdot S_H,$$

где l – длина турбулентности, $S_H = \frac{-107,23}{1 - 777,88 \cdot G_H}$ и $S_M = \frac{152,68 \cdot S_H \cdot G_H - 6,16}{1 - 137,45 \cdot G_H}$ –

функции Ричардсона, а $G_H = -\frac{l^2}{q^2} \cdot \frac{g}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial p}{\partial z} \right)$ – число Ричардсона.

Расчет коротковолновой радиации на уровне z_i происходит согласно:

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

$$swrad = SC \cdot (0.91 - \delta(1 - \sin \alpha)) \cdot (1 - 0.71n) \cdot (1 - \beta) ,$$

где $D=H+\eta$, H – глубина, η – уровень свободной поверхности, $swrad$ – уровень коротковолновой радиации на поверхности, $SC=1370$ Вт/м² – солнечная постоянная, $\delta=0,85$ – коэффициент переноса радиации атмосферой, α – высота Солнца, n – коэффициент облачности, $\beta=0,05$ – альbedo водной поверхности.

Влияние ветра задавалось через касательное напряжение ветра (τ_u, τ_v) следующим образом:

$$\langle \tau_u \rangle = 1,935 \cdot 10^{-6} \cdot U_{wind} , \quad \langle \tau_v \rangle = 1,935 \cdot 10^{-6} \cdot V_{wind} ,$$

где U_{wind}, V_{wind} – компоненты скорости ветра.

На поверхности ($\sigma=0$) вертикальные граничные условия заданы следующими выражениями:

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

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

$$\frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} = -\langle w_T \rangle , \quad \frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} = -\langle w_S \rangle ,$$

где ω – вертикальная (в системе σ -координат) компонента скорости.

На дне ($\sigma=-1$) вертикальные граничные условия задаются следующим образом:

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

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

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

На твердой границе задается условие отсутствия нормальной к берегу компоненты скорости. Также считается, что на данной границе отсутствуют потоки тепла и соли.

Вычисления проводились в трехмерном прогностическом режиме, время моделирования – 30 часов. Для определения начальных условий была выбрана океанографическая съемка, проведенная 26–31 мая 2004 года (Отчет..., 2004). Материал 79 STD-станций (схема расположения показана на рисунке 1) послужил исходной информацией для построения начальных распределений температуры и солёности по стандартным горизонтам акватории залива. Для создания регулярных сеток исходных данных (полей распределения температуры и солёности), необходимых для работы программы моделирования, использовался метод кубической интерполяции, основанный на алгоритме триангуляции.

Атмосферные и иные характеристики выбраны постоянными при проведении моделирования и были приняты за:

1. атмосферное давление – 1010 гПа;
2. температура воздуха – 12°C;
3. влажность – 90%;
4. коэффициент облачности – 0 (что соответствует безоблачной погоде);
5. направление и скорость ветра задавались в рамках проводимого эксперимента;
6. сток рек в залив Анива не учитывался;
7. влияние течения Соя на формирование поля течений в заливе Анива при проведении описываемых экспериментов не учитывалось, так как согласно данным интегрированной системы приема и обработки спутниковых данных TeraScan в рассматриваемое время проявление течения Соя наблюдалось только у северного побережья о. Хоккайдо.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Численные эксперименты проводились при наиболее вероятных для этого сезона ветрах южных румбов: юго-восточном, южном, юго-западном, при прочих одинаковых условиях. Поля поверхностных и придонных течений, смоделированные для различных направлений ветров, представлены на рисунке 2. Модельные поля температуры и солёности представлены на рисунке 3.

При юго-восточном ветре наблюдается отток вод со скоростью 20–25 см/с в южной части залива, что вызывает перемещение из центральных районов залива более холодных и менее солёных вод. Периферия данного течения (скорость 10–15 см/с) наблюдается и в центральной части залива, где происходит небольшое уменьшение солёности вод. Вдоль восточного побережья залива наблюдается прибрежное течение, идущее от мыса Анива в сторону бухты Лососей. Данное течение характеризуется повышенной скоростью (10–20 см/с) по сравнению со скоростями близлежащих вод (5–10 см/с). В поле донных течений наблюдаются сильное течение вдоль южной границы залива (10–15 см/с) и широкое течение вдоль западного побережья. В северо-восточной части залива наблюдается небольшой апвеллинг более солёных вод, что приводит к изменению солёности в этом районе.

При южном ветре течение вдоль южной границы залива затрагивает меньшие акватории, чем при юго-восточном ветре. Скорость течения, за исключением западной части, уменьшается в два раза. В центре залива периферия течения определяется плотностной циркуляцией, вследствие чего течение более узкое, чем в предыдущем случае, и происходит усиление течения вдоль восточного побережья залива (до 15–20 см/с). Вдоль западного побережья также наблюдается прибрежное течение (10–25 см/с), которое захватывает большую часть севера залива. Данное течение приводит к распространению вдоль западного побережья более холодных и солёных вод.

При юго-западном ветре сформировавшееся поле течений определяется направлением ветра, плотностная циркуляция водных масс прослеживается только в северной части залива. Течение вдоль северо-западного побережья залива Анива, характеризующееся скоростями 10–25 см/с, распространяет вдоль берега более солёные и холодные воды. В донном слое видны апвеллинг у западного берега и течение вдоль восточного побережья, распространяющее воды в стороны мыса Анива. Поля температуры и солёности при юго-восточном ветре изменяются дрейфом в юго-восточном направлении.

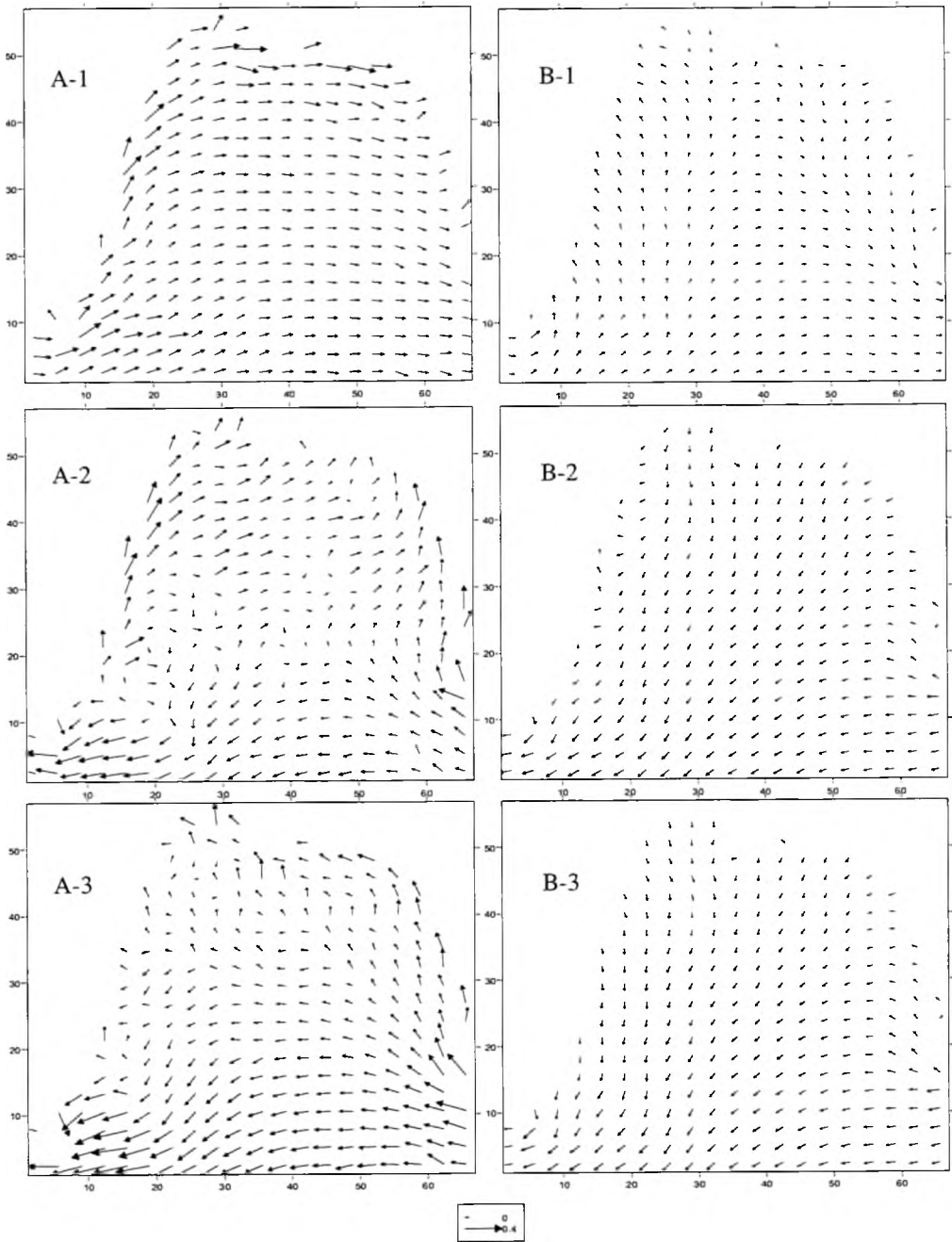


Рис. 2. Смоделированное поле поверхностных (А) и придонных (В) морских течений в заливе Анива при различных направлениях ветров: 1 – юго-западный ветер; 2 – южный ветер; 3 – юго-восточный ветер. Скорость ветра во всех случаях – 5 м/с

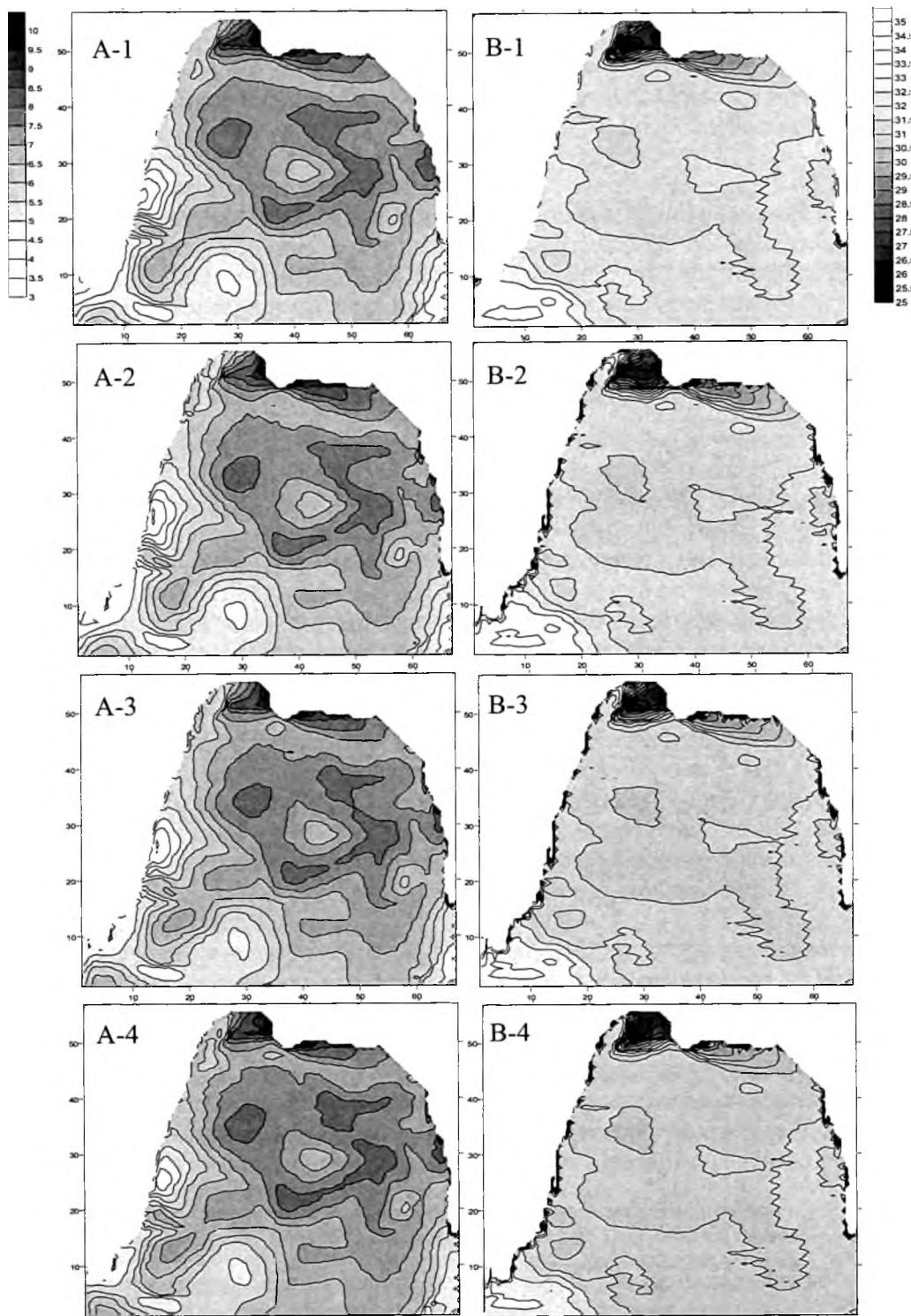


Рис. 3. Смоделированные поля температуры (А) и солёности (В) в заливе Анива при различных направлениях ветров: 2 – юго-западный ветер; 3 – южный ветер; 4 – юго-восточный ветер. Скорость ветра во всех случаях – 5 м/с. 1 – начальные поля распределений

Сильная перестройка течений в зависимости от господствующего ветра показывает, что вихревой поток в центральной части залива, описанный в работах В. Д. Будаевой и В. М. Пищальника (Будаева и др., 1980; Budaeva, Makarov, 1996; Пищальник, Архипкин, 1999), является слабовыраженным в это время года, что связано с перестройкой вращения вихря с циклонического на антициклоническое. Небольшое увеличение абсолютных значений скоростей течений происходит за счет введения в моделирующую программу расчета воздействия ветра. В то же время наблюдаются различия при сравнении данных в районах мысов Анива и Крильон. Это можно объяснить отсутствием океанографических станций наблюдения в областях, находящихся западнее мыса Крильон и восточнее мыса Анива, вследствие чего интерполяционный алгоритм создал поля температуры и солёности с постоянным знаком градиента, что с большой вероятностью не соответствует реальному распределению этих физических величин.

Для подтверждения слабого влияния вихря в рассматриваемый период был проведен расчет геострофических течений на разрезе мыс Анастасии – мыс Анива по STD-данным съемки 26–31 мая 2004 г. на НПС «Дмитрий Песков» (СахНИРО), осуществленный с помощью пакета обработки океанографических данных Ocean Data View. Полученное вертикальное распределение скоростей показано на рисунке 4. Данный расчет анализирует «мгновенный» момент времени, в силу чего не учитывает направление и скорость ветра. Как видно из диаграммы, в данное время года скорость течений вихря невелика (до 4 см/с), что позволяет сделать вывод о первичной роли ветра при формировании поля течений. Таким образом, проведенный анализ показывает, что смоделированное распределение течений не противоречит известным ранее данным.

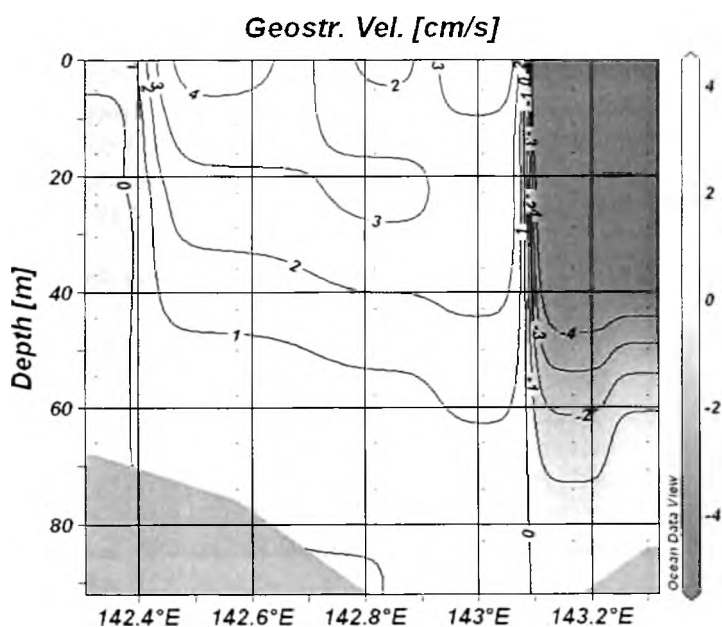


Рис. 4. Расчет геострофических течений на разрезе мыс Анастасии – мыс Анива, проведенный с помощью Ocean Data View. По вертикальной шкале отложена глубина, измеряемая в метрах. Положительное направление оси скорости (см/с) соответствует северному течению

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении численных экспериментов с использованием модельной сетки с размерами ячейки 2700 м полученные поля течений не противоречат ранее известным результатам, что позволяет сделать вывод о применимости принстонской океанологической модели (ПОМ), входящими данными для которой являются поля температуры и солёности, к расчету полей распределения гидродинамических величин и циркуляции в заливе Анива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будаева, В. Д. Диагностические расчеты стационарных течений в заливе Анива и проливе Лаперуза / **В. Д. Будаева, В. Г. Макаров, И. Ю. Мельникова** // Тр. ДВНИГМИ. – 1980. – Вып. 87. – С. 66–78.
2. Отчет о научно-исследовательских работах на НИС «Дмитрий Песков» в заливе Анива в мае–июне 2004 года : Рейсовый отчет / СахНИРО; Отв. исполн. А. К. Клитин. – Ю-Сах., 2004. – 59 с. – Арх. № 9604 н/а.
3. Пищальник, В. М. Сезонные вариации циркуляции вод на охотоморском шельфе острова Сахалин / **В. М. Пищальник, В. С. Архипкин** // Гидрометеоролог. и эколог. условия Дальневосточных морей: оценка воздействия на морскую среду : Темат. вып. ДВНИГМИ № 2. – Владивосток : Дальнаука, 1999. – С. 84–95.
4. Budaeva, V. D. Modeling of the typical water circulations in the La Perouse Strait and Aniva Gulf region / **V. D. Budaeva, V. G. Makarov** // PICES Sci. Reports. – 1996. – Vol. 6. – P. 17–20.
5. Ezer, T. Sensitivity studies with the North Atlantic sigma coordinate Princeton Ocean Model / **T. Ezer, G. L. Mellor** // Dynamics of Atmospheres and Oceans. – 2000. – Vol. 32. – P. 185–208.
6. Goni, M. A. Sources and distribution of organic matter in a river-dominated estuary (Winyah Bay, SC, USA) / **M. A. Goni, M. J. Teixeiraa, D. W. Perkeya** // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2003. – Vol. 57. – P. 1023–1048.
7. Hearn, C. J. On the effects of wind and tides on the hydrodynamics of a shallow mediterranean estuary / **C. J. Hearn, B. J. Robson** // Continental Shelf Research. – 2002. – Vol. 22. – P. 2655–2672.
8. Liu, J. T. Numerical modeling study of sediment dispersal by a river plume / **J. T. Liu, S.-Yu Chao, R. T. Hsu** // Continental Shelf Research. – 2002. – Vol. 22. – P. 1745–1773.
9. Mellor, G. L. Sigma coordinate pressure gradient errors and the seamount problem / **G. L. Mellor, L.-Y. Oey, T. Ezer** // Journal of Atmospheric and Oceanic technology. – 1998. – Vol. 15. – P. 1122–1131.
10. **Mellor, G. L.** Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model / G. L. Mellor. – 2004. – 56 p.

Никонов, Ю. Ю. Численное моделирование циркуляции вод в заливе Анива по данным океанографической съемки 26–31 мая 2004 года / Ю. Ю. Никонов // 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, 2005. – Т. 7. – С. 245–254.

В статье представлены результаты численного моделирования гидродинамических параметров от начальных условий, полученных по данным океанографической съемки, проводимой в заливе Анива (о. Сахалин) в период 26–31 мая 2004 г. Описаны условия моделирования при использовании численной трехмерной принстонской океанологической модели. Рассчитаны поля поверхностных и донных течений, температуры и солёности, возникающие при ветрах южных румбов, характерных для летнего периода в рассматриваемом регионе.

Ил. – 4, библиогр. – 10.

Nikonov, Yu. Yu. Numerical modeling of water circulation in Aniva Bay by the data of oceanographic survey (26–31 May 2004) / Yu. Yu. Nikonov // 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, 2005. – Vol. 7. – P. 245–254.

The results of numerical modeling of hydrodynamic parameters from the initial conditions are given based on the data of oceanographic survey conducted in Aniva Bay (Sakhalin Island) during 26–31 May 2004. Requirements for modeling using a Numerical Three-Dimensional Princeton Oceanological Model are described. The fields of surface and bottom currents, and also temperature and salinity fields occurring under the south-point winds common for summer period in the study region were calculated.

Fig. – 4, ref. – 10.