

УДК 551.465.45(265.54):574.52

К.А. Рогачев*

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
ДВО РАН, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

АНТИЦИКЛОНИЧЕСКАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ УССУРИЙСКОГО ЗАЛИВА ЯПОНСКОГО МОРЯ И ЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА БИОТУ

Изучена циркуляция вод Уссурийского залива и прилегающих районов зал. Петра Великого. Показано, что вода, заполняющая Уссурийский залив, происходит из мезомасштабных вихрей, расположенных в его южной части у континентального склона. Развитие субмезомасштабных струй является основным процессом, обеспечивающим поступление воды в залив. Антициклоническая циркуляция существенно понижает относительную завихренность как в самом заливе, так и в области мезомасштабного вихря. Понижение завихренности приводит к значительному увеличению переноса массы воды в Уссурийский залив. Субмезомасштабные струи являются основным динамическим процессом, меняющим температуру воды в заливе во время осенней миграции кеты, поэтому они определяют период подхода осенней кеты в залив. Поскольку температура меняется быстро, процесс, определяющий рост и снижение температуры в переходные сезоны, устанавливает благоприятный период для теплолюбивых моллюсков и беспозвоночных.

Ключевые слова: прибрежная экосистема, Уссурийский залив, термические границы тихоокеанского лосося.

Rogachev K.A. Anticyclonic circulation in the Ussuri Bay (Japan Sea) and its impact on biota // *Izv. TINRO*. — 2010. — Vol. 160. — P. 236–244.

Water circulation in the Ussuri Bay is studied on the data of direct currents observations. Water flow enters the Bay from the south driven by mesoscale eddy located at the continental slope, so submesoscale streamers are the major factors of water temperature and salinity heightening there. On the other hand, the anticyclonic circulation decreases the relative vorticity in the Bay. These events establish rapid advection of warm water from the deep sea and determine the thermal limits for species such as salmon and mollusks, in shallow coastal area.

Key words: coastal ecosystem, Ussuri Bay, optimal temperature, pacific salmon.

Введение

В настоящее время не существует сколько-нибудь детальных океанографических наблюдений, которыми была бы определена циркуляция вод в Уссурийс-

* Рогачев Константин Анатольевич, ведущий научный сотрудник, e-mail: rogachev@poi.dvo.ru.

ком заливе и его бухтах. Модели, которые использовались до сих пор для расчета средней циркуляции в бухтах и заливе, не основывались на результатах инструментальных наблюдений и противоречат им (Будаева и др., 2006; Рогачев, Горячев, 2008).

В бухтах Суходол, Ильмовая и Дунай Уссурийского залива расположены хозяйства марикультуры. В Бухте Суходол культивируется приморский гребешок *Mizuhopecten yessoensis*. Эта бухта является также одним из немногих мест воспроизводства анадары Броутона *Anadara broughtonii*, которая является теплолюбивым видом (Афейчук и др., 2004; Калинина, 2008). Поскольку температура весной и осенью меняется быстро, процесс, определяющий ее рост и снижение в переходные сезоны, устанавливает благоприятный период для теплолюбивых моллюсков и беспозвоночных. Поэтому для сохранения популяции анадары и других моллюсков важно понимать причину быстрого изменения придонной температуры в бухтах залива.

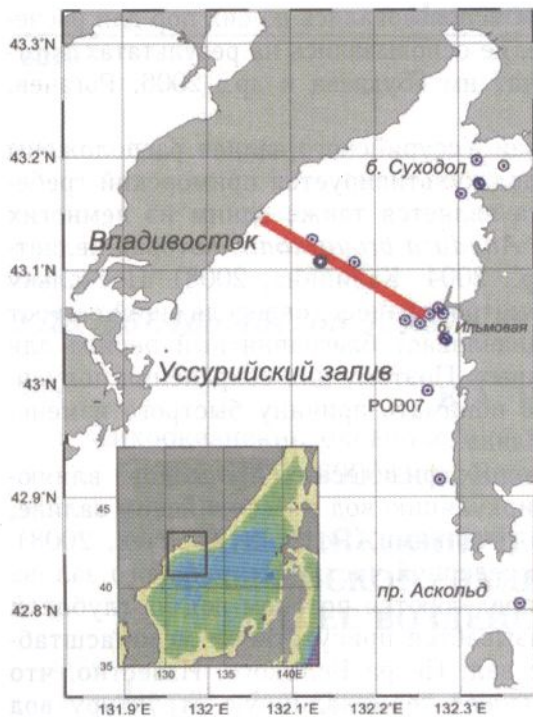
Ранее для определения доминирующих физических процессов, влияющих на жизненный цикл моллюсков и циркуляцию вод в Уссурийском заливе, использовались прямые наблюдения за течениями (Рогачев, Горячев, 2008). При этом было показано, что течения в северной части Уссурийского залива и бухте Суходол в теплое время года определяются потоком вод из глубокой части зал. Петра Великого, который вызывается присутствием мезомасштабного вихря на континентальном склоне зал. Петра Великого. Известно, что мезомасштабные вихри существенно меняют термохалинную структуру вод (Rogachev et al., 2007; Рогачев, Шлык, 2009). Прямые наблюдения за течениями позволили установить скорости течений на северной границе этого вихря и выявили устойчивую антициклоническую циркуляцию в Уссурийском заливе. При этом в бухте Суходол устанавливается локальная антициклоническая циркуляция, способная удерживать личинки моллюсков до их оседания. Личинки гребешка остаются с планктоном в течение около 2 нед, перед тем как прикрепиться к водорослям (Седова, Соколенко, 2008). Захват (удержание) личинок в области подветренного антициклонического вихря может быть важным фактором, поддерживающим его популяцию, поэтому такая циркуляция может определять благоприятные условия для оседания и завершения жизненного цикла моллюсков (Рогачев, Горячев, 2008). Мы полагаем, что хозяйство аквакультуры в бухте Суходол использует естественные благоприятные условия для популяции моллюсков, созданные особенностью циркуляции вод. В свою очередь, популяция анадары также полностью зависит от продолжительности периода относительно высокой благоприятной температуры для ее воспроизводства.

Цель настоящей работы — установить основные характеристики течений Уссурийского залива, понять природу циркуляции вод и роль мезомасштабных физических процессов.

Материалы и методы

Полевые работы выполнялись в 2008–2009 гг. Для того чтобы понять физические механизмы, которые определяют динамику вод, мы выполнили измерения течений и термохалинных характеристик. На рис. 1 приведено положение станций с измерителями течений в 2008 г., использованных в настоящем исследовании. На рис. 2 — положение буев с измерителями течений и станций в 2009 г. Целью станций был сбор данных об основных физических процессах, определяющих циркуляцию вод и характеристиках водных масс в заливе.

Зондирования на гидрологических станциях проводились зондом Сиберд 19. Измерения течений выполнялись путем постановки буйковых станций с



инструментами S4 Interocean. Данные спутников NOAA собраны Центром коллективного пользования Институтом автоматизации и процессов управления ДВО РАН (г. Владивосток).

Рис. 1. Район исследований и положение станций с измерителями течений в 2008 г. Широкая линия отмечает положение гидрологических разрезов

Fig. 1. Study area and position of buoys with current meters in 2008. Broad line shows CTD sections used in Figs. 3, 4, 6

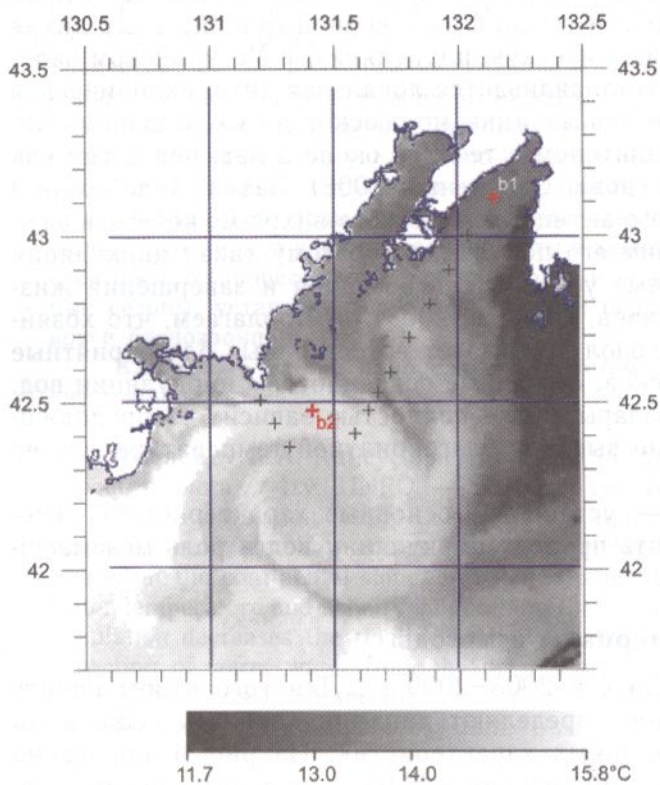


Рис. 2. Положение буев (b1, b2) с измерителями течений и гидрологических станций в 2009 г. Показано поле поверхностной температуры по данным спутника NOAA-17 за 22 сентября 2009 г. Мезомасштабный антициклонический вихрь с центром 42°20' с.ш. 131°30' в.д. формирует субмезомасштабную струю теплой воды, проникающую в Уссурийский залив

Fig. 2. Study area and position of buoys with current meters in 2009. Sea surface temperature image is obtained from the NOAA-17 satellite in September 22. The mesoscale anticyclonic eddy with the center in 42°20'N, 131°30'E forms the submesoscale streamer penetrating into the Ussuri Bay

Результаты и их обсуждение

Динамика вод в заливе в значительной степени находится под воздействием мезомасштабных и субмезомасштабных процессов. Спутниковые наблюдения указывают на постоянное присутствие мезомасштабных антициклонических вихрей диаметром 20–80 км на континентальном склоне зал. Петра Великого (устное

сообщение С.Л. Ладыченко). Наши наблюдения, выполненные в сентябре, показывают, что ядро таких вихрей (20–100 дбар) содержит теплую воду (~ 14–18 °С) низкой солености.

В теплый период года в заливе устанавливается устойчивая стратификация (рис. 3–5). Одна из причин ее создания связана с потоком вод из глубокого моря. Так, температура верхнего слоя в сентябре достигала 21 °С благодаря поступлению теплой воды из глубокой части Японского моря (рис. 3–4, 6). Особенно выразительным стал рост температуры в придонном слое (рис. 6). Температура в сентябре в придонном слое превышала 16 °С, при этом соленость составляла около 33 psu (см. рис. 3–4, 6, 7). Поскольку соленость верхнего слоя была значительно ниже, это означает, что она была понижена во всем слое от поверхности до дна (рис. 4). Из-за низкой солености и высокой температуры в этот период наблюдались низкие значения плотности: в придонном слое — около 24 кг/м³, в верхнем — 22–23 кг/м³. Такие низкие значения солености и плотности, вместе с высокими значениями температуры, близки к соответствующим значениям в области ядра антициклонического мезомасштабного вихря, расположенного на континентальном склоне зал. Петра Великого (рис. 2). Спутниковые наблюдения указывают на проникновение субмезомасштабных струй, поставляющих теплую воду низкой солености в залив (рис. 2, 8). Тем самым в результате сильного обмена вод Уссурийского залива с глубоким морем относительно быстро изменяются характеристики вод.

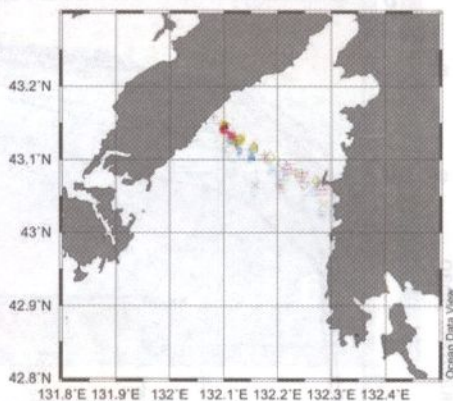
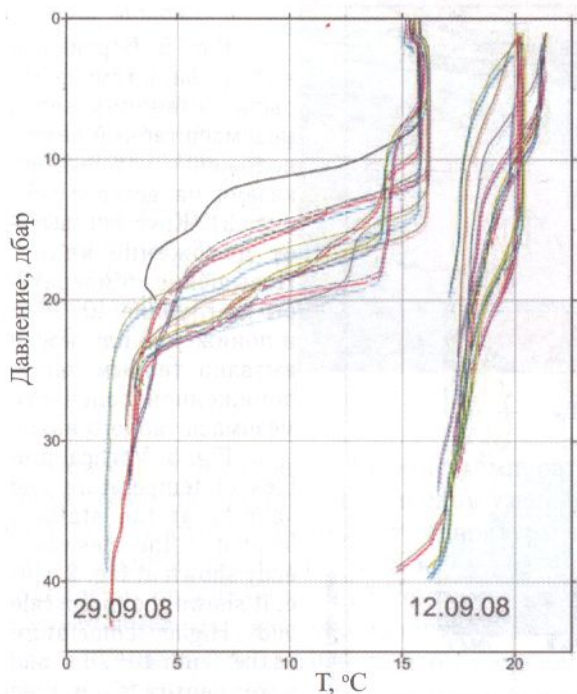


Рис. 3. Понижение температуры в Уссурийском заливе с 12 по 29 сентября 2008 г. На карте показаны разрез и станции

Fig. 3. Decreasing of water temperature in the Ussuri Bay from September 12 to September 29, 2008. CTD section and stations are shown

Мы предположили, что приливы и приливные течения не являются определяющими процессами в Уссурийском заливе, поскольку достаточно слабы. Для того чтобы это показать, мы выполнили измерения приливов в течение полугода. На их основе было сделано заключение, что прилив является неправильным полусуточным. Диапазон колебаний уровня моря в глубокой части залива достигает 45 см. Отношение амплитуд гармоник

$\frac{K1+O1}{M2+S2} = 1,05$, где

$K1$, $O1$ — суточные, $M2$, $S2$ — полусуточные гармоники. Хорошо выраженный двухнедельный цикл изменений уровня моря связан с модуляцией двух суточных гармоник $O1$ и $K1$.

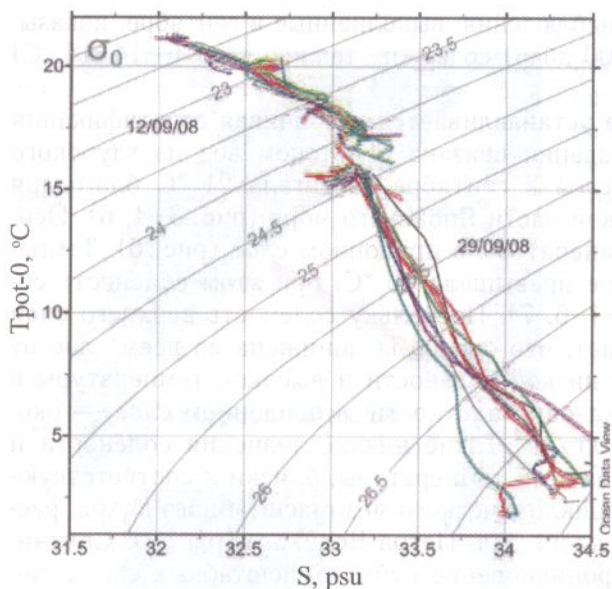


Fig. 4. TS-diagram for the stations in September 12 and 29, 2008. During this period, water temperature became lower in 15 °C and water salinity and density became higher

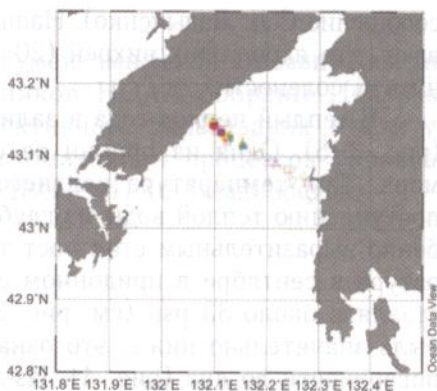


Рис. 4. TS-диаграмма для станций, выполненных 12 и 29 сентября 2008 г. Понижение температуры в придонном слое составило около 15 °C и сопровождалось ростом солености и плотности (σ_0)

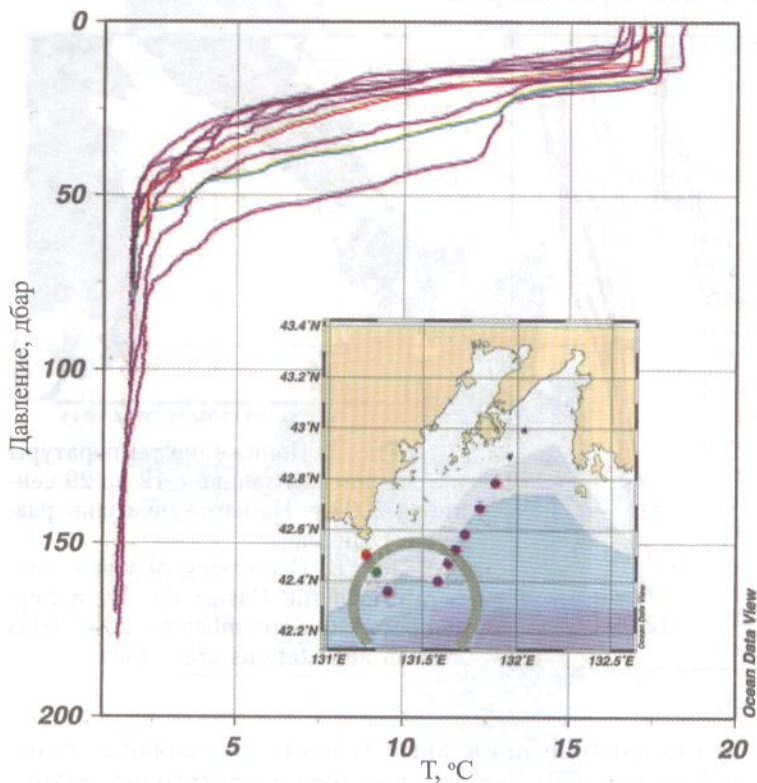


Рис. 5. Вертикальные профили температуры на станциях через мезомасштабный вихрь, положение которых показано на вставке (см. рис. 2). Круг показывает положение вихря. Повышение температуры на глубине 40–70 м и понижение плотности вызвано теплым ядром пониженной солености мезомасштабного вихря

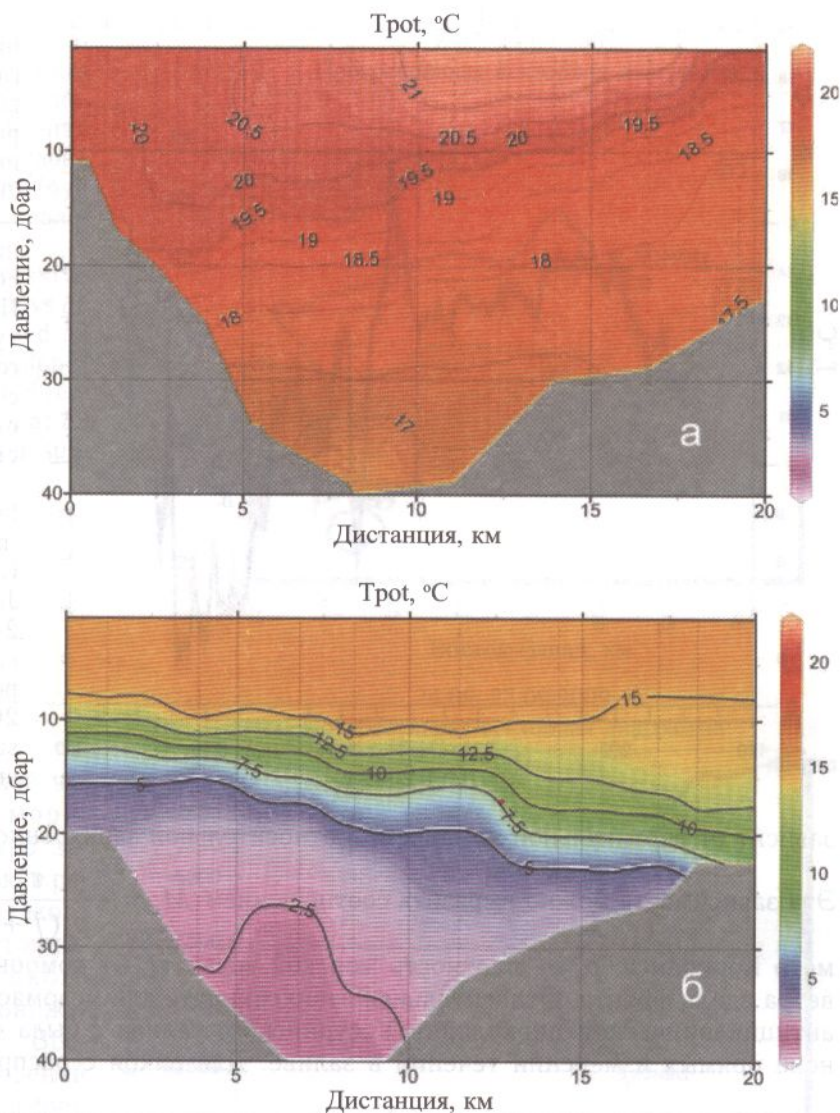
Fig. 5. Vertical profiles of temperature and salinity at the stations located in the mesoscale eddy shown at Fig. 2. Circuit shows the mesoscale eddy. Higher temperature at the depth 40–70 m and lower density is observed in the core of the eddy

Прогрессивная векторная диаграмма станции POD-7 в восточной части Уссурийского залива (см. рис. 1) указывает на устойчивый поток к югу со скоростью течения до 35 см/с. К северу от этой станции скорость потока достигала 45–50 см/с. Измерения, выполненные в западной части залива, выявили поток на северо-восток в верхнем слое. Тем самым мы обнаружили устойчивую антициклоническую циркуляцию в заливе в теплый период года.

Поперечный разрез, выполненный 29 сентября 2008 г., показал значительные изменения, произошедшие через две недели. Наиболее выразительным со-

Рис. 6. Поперечный разрез потенциальной температуры (при давлении, равном нулю) в Уссурийском заливе 12 (а) и 29 сентября (б) 2008 г. Понижение температуры в Уссурийском заливе на величину около 15 °С в придонном слое произошло за короткий период около 5 дней. Этот период резкого изменения температуры был определен по данным буйковой станции. Положение разрезов показано на рис. 1

Fig. 6. Cross-section of potential temperature in the Ussuri Bay in September 12 (a) and September 29 (б), 2008. The section position is shown at Fig. 1



бытием стало быстрое понижение температуры (рис. 6), рост солёности и плотности. Температура придонного слоя уменьшилась на ~ 15 °С, солёность выросла на 1 psu. Быстрое снижение температуры и рост солёности привели к повышению условной плотности на 3 кг/м³ за 4 дня. Характеристики температуры и солёности, определенные 12 сентября на том же поперечном разрезе, соответствуют верхнему слою мезомасштабного вихря глубокой части моря. Спутниковые наблюдения показывают, что субмезомасштабные струи теплых вод проникали в Уссурийский залив в этот период. Понижение температуры придонного слоя, увеличение солёности и плотности произошло в результате смены ветра и прекращения потока вод субмезомасштабных струй. Экмановский перенос в результате действия сильного северо-западного ветра привел к поступлению холодной, солёной и плотной воды Приморского течения.

Субмезомасштабные струи имеют поперечный размер от 2 до 10 км. Такие струи формируются на границе мезомасштабных вихрей и поставляют воду из ядра вихрей в Уссурийский залив (см. рис. 2). Наиболее вероятный механизм, который обеспечивает развитие субмезомасштабных струй, связан с неравномерностью экмановского переноса из-за понижения относительной завихренности мезомасштабного вихря. Понижение относительной завихренности ζ приводит к значительному увеличению экмановского переноса. Экмановский перенос массы M_e

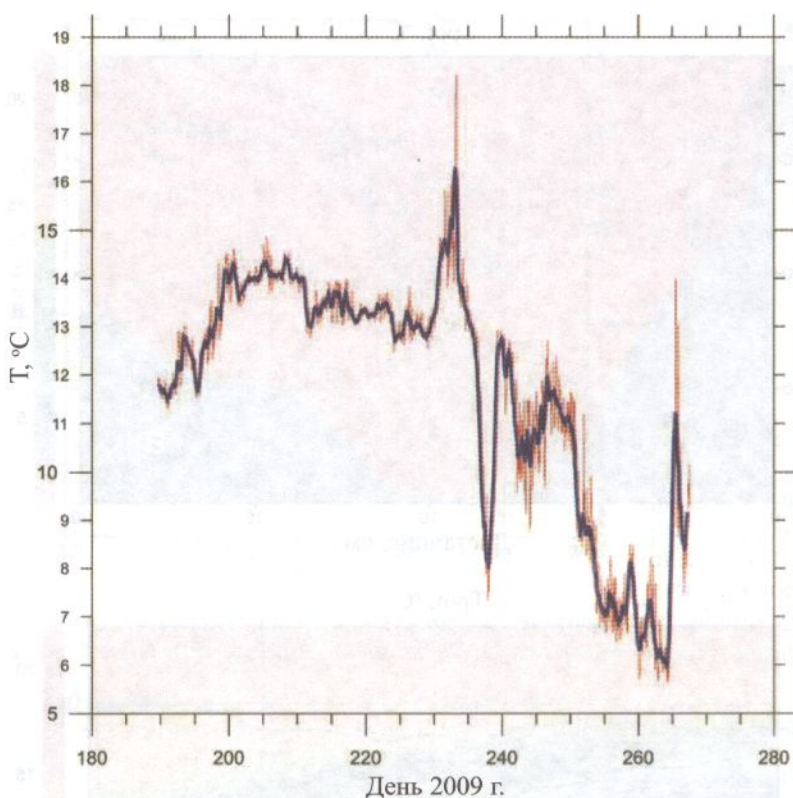


Рис. 7. Изменение температуры на глубине 20 м в центральной части Уссурийского залива с 8 июля по 24 сентября 2009 г. Тонкая линия — часовые наблюдения, толстая — 5-часовое сглаживание. Повышение температуры с 265-го дня года на 8 °С связано с проникновением субмезомасштабной струи (см. рис. 2)

Fig. 7. Water temperature decrease in the Ussuri Bay (depth 20 m) from July 8 to September 24, 2009. Sharp increasing of the temperature after the day 265 was caused by submesoscale streamer shown at Fig. 2

зависит от вертикальной компоненты относительной завихренности (Stern, 1965).

Эту зависимость можно выразить соотношением $M_e = -\frac{\tau_w^x}{\rho_o(f + \zeta)}$, где f — пара-

метр Кориолиса; ρ_o — плотность морской воды; τ_w^x — компонента напряжения ветра вдоль фронта. Относительная завихренность для мезомасштабного вихря и антициклонической циркуляции Уссурийского залива ζ была определена на основе прямых измерений течений в заливе. Для вихря с распределением азимутальной скорости по радиусу $v(r)$ относительная завихренность $\zeta = \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r}$. Для

твердотельного вращения вихря $\zeta = 2v/r$ и может составлять 30 % от величины планетарной завихренности. Наиболее вероятной причиной формирования субмезомасштабной струи является понижение завихренности течения в области мезомасштабного вихря. Формирование субмезомасштабной струи в результате усиления экмановского переноса в настоящее время является гипотезой. Для определения точного механизма образования струй в заливе нужны детальные прямые измерения течений.

Заключение

На основе новых наблюдений за течениями в Уссурийском заливе мы обнаружили, что антициклоническая циркуляция мезомасштабного вихря существенно понижает относительную завихренность. Понижение завихренности приводит к значительному увеличению глубины трения слоя Экмана и росту переноса массы в Уссурийский залив. Этот эффект ранее не рассматривался как сколь угодно значимый. Вместе с тем именно он обеспечивает быстрый обмен вод залива с глубокой частью Японского моря.

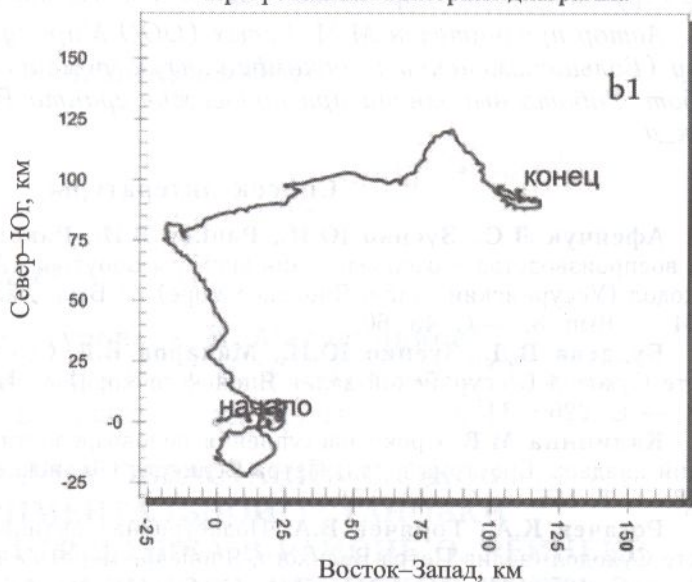
Благоприятный режим для развития придонных организмов (с относительно высокой температурой) начинается весной и связан именно с поступлением теп-

Рис. 8. Прогрессивная векторная диаграмма для буйев указывает на потоки разного направления в нижнем слое на склоне зал. Петра Великого (буй *b2*) и в Уссурийском заливе (*b1*)

Fig. 8. Progressive vector plots for the buoys *b1* (in the Ussuri Bay) and *b2* (at the continental slope) that shows different direction of flows; the flow at *b2* corresponded to water subduction

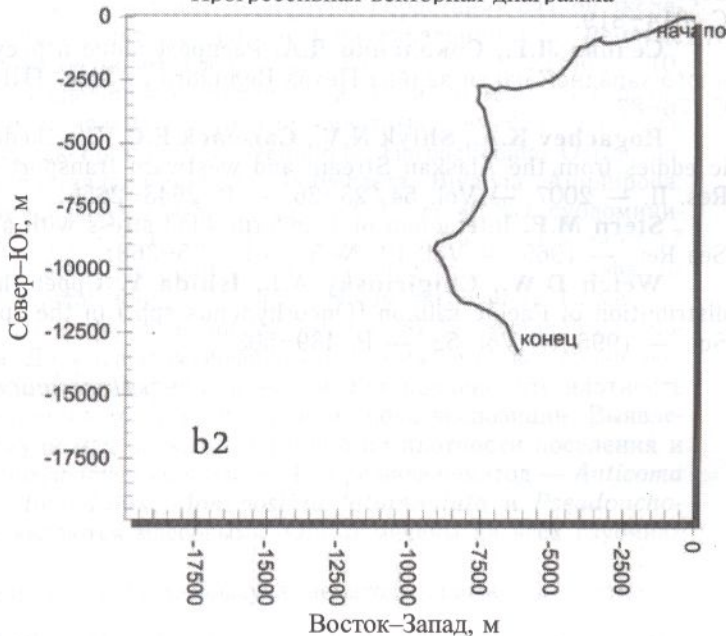
8.07–24.09.2009

Прогрессивная векторная диаграмма



24.09–27.09.2009

Прогрессивная векторная диаграмма



лых вод из глубокой части Японского моря. Этот режим быстро заканчивается осенью в результате драматического обмена с промежуточными водами глубокого моря и резкого понижения температуры. Временной ряд наблюдений за температурой на буйковой станции показал ее снижение на 15 °C в течение 5 дней (см. рис. 4, 6). Тем самым циркуляция вод в заливе летом и осенью полностью определяет благоприятный период для развития моллюсков и беспозвоночных.

Известно, что температура является основным океанографическим фактором, определяющим южную границу распределения лососей в окраинных морях (Welch et al., 1995). Термические фронты ограничивают область их обитания. Это происходит из-за того, что степень метаболизма при высокой температуре превышает поступление энергии за счет питания. Чтобы избежать высокой температуры и оставаться в холодной воде ($< \sim 10,4$ °C для кеты и $< 8,9$ °C для нерки), лососи могут менять глубину обитания. Однако такие вертикальные миграции невозможны в мелких прибрежных областях во время осенней миграции. Развитие субмезомасштабных струй является важным динамическим процессом, меняющим температуру прибрежных областей во время миграции осенней кеты.

Поскольку высокая температура препятствует подходу кеты, субмезомасштабные струи полностью определяют период подхода лососей в нерестовые реки.

Автор признателен М.М. Косых (ООО Марикультура) и Е.В. Коломейцеву (Большекаменский рыбокомбинат) за помощь при проведении полевых работ. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 09-05-98521-р_восток_а.

Список литературы

Афейчук Л.С., Зуенко Ю.И., Рачков В.И., Раков В.А. Экологические условия воспроизводства и распределения анадары Броутона (*Anadara broughtonii*) в бухте Суходол (Уссурийский залив, Японское море) // Бюл. Дальневост. Малакол. о-ва. — 2004. — Вып. 8. — С. 43–60.

Будаева В.Д., Зуенко Ю.И., Макаров В.Г. Структура и циркуляция вод в бухте Суходол (Уссурийский залив Японского моря) // Изв. ТИНРО. — 2006. — Т. 146. — С. 226–234.

Калинина М.В. Сроки наступления половозрелости и половая структура скопленных анадары Броутона в зал. Петра Великого (Японское море) // Изв. ТИНРО. — 2008. — Т. 155. — С. 144–151.

Рогачев К.А., Горячев В.А. Подветренная антициклоническая циркуляция в бухте Суходол (залив Петра Великого, Японское море) // Изв. ТИНРО. — 2008. — Т. 154. — С. 125–134.

Рогачев К.А., Шлык Н.В. Изменение характеристик халоклина и рост температуры в Камчатском течении и Ойясио // Океанол. — 2009. — Т. 49, № 6. — С. 814–819.

Седова Л.Г., Соколенко Д.А. Распределение и ресурсы приморского гребешка в юго-западной части залива Петра Великого // Изв. ТИНРО. — 2008. — Т. 155. — С. 76–87.

Rogachev K.A., Shlyk N.V., Carmack E.C. The shedding of mesoscale anticyclonic eddies from the Alaskan Stream and westward transport of warm water // Deep-Sea Res. II. — 2007. — Vol. 54/23–26. — P. 2643–2656.

Stern M.E. Interaction of a uniform wind stress with a geostrophic vortex // Deep-Sea Res. — 1965. — Vol. 12, № 3. — P. 355–368.

Welch D.W., Chigirinsky A.I., Ishida Y. Upper thermal limits on the oceanic distribution of Pacific salmon (*Oncorhynchus* spp.) in the spring // Can. J. Fish. Aquat. Sci. — 1995. — Vol. 52. — P. 489–503.

Поступила в редакцию 30.11.09 г.