

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ДИНАМИКА АНТИЦИКЛОНИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ И БЫСТРОЕ ОБНОВЛЕНИЕ ВОД УССУРИЙСКОГО ЗАЛИВА (ЯПОНСКОЕ МОРЕ) ПО СПУТНИКОВЫМ И МОРСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ

© 2013 г. К. А. Рогачев

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток

E-mail: rogachev@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 26.03.2012 г.

Динамика вод на шельфе и континентальном склоне залива Петра Великого исследована недостаточно. В придонном слое Амурского и Уссурийского заливов может наблюдаться низкая концентрация растворенного кислорода, причина которой не ясна. В тоже время механизм вентиляции (обновления) придонных вод Уссурийского залива и его бухт до сих пор не определен. В работе на основе спутниковых и прямых наблюдений изучена динамика вод Уссурийского залива и прилегающих районов залива Петра Великого. Спутниковые наблюдения включают изображения различных каналов радиометра AVHRR спутников NOAA и данные MODIS Aqua и Terra, предоставленные Центром коллективного пользования регионального спутникового мониторинга ДВО РАН. Для того чтобы установить характеристики антициклонических вихрей, в дополнение к этим данным, выполнены измерения придонного давления, течений, температуры и солености. Антициклонические вихри, расположенные у границы шельфа формируют антициклоническую циркуляцию в Уссурийском заливе и могут быстро менять структуру его вод. Спутниковые и прямые наблюдения показали, что антициклонический вихрь формирует подъем вод на границе шельфа. В результате происходит быстрое обновление придонного слоя Уссурийского залива. Такая вентиляция вод приводит к быстрому понижению температуры (около 15°C), росту солености и плотности.

Ключевые слова: антициклонические вихри, вентиляция придонных вод, Уссурийский залив

DOI: 10.7868/S0205961413020103

ВВЕДЕНИЕ

Уссурийский залив и его бухты являются важным местом культивирования трепанга и моллюсков (Гаврилова и др., 2008, 2010). В северной части Уссурийского залива сохранилась также небольшая популяция анадары (Афейчук и др., 2004; Олифиренко и др., 2007; Седова и др., 2009). Вместе с тем динамика вод на шельфе залива Петра Великого исследована недостаточно. В настоящее время нет долговременных прямых измерений течений, не определены характеристики циркуляции вод в самом заливе и, особенно, в его бухтах. Результаты расчетов циркуляции вод в бухте Суходол и Уссурийском заливе противоречат инструментальным наблюдениям (Афейчук и др., 2004; Будаева и др., 2006, 2010; Рогачев, 2010). Важная мотивация исследования динамики вод связана с необходимостью понять механизм вентиляции нижнего слоя вод, меняющий концентрацию растворенного кислорода. Кроме того, в Приморском крае и в Амурском заливе сохранились нерестовые реки. Известно, что основным фактором, который определяет распределение

лососей в море, является температура (Welch et al., 1995, 1998). Например, для кеты максимальная температура обитания в море составляет около 10°C. Высокая температура во всей водной толще (больше 10°C), по крайней мере, существенно сдвигает сроки возврата лососей к местам нереста. Поэтому важно понять, как быстро меняется температура и в чем причина таких изменений.

Спутниковые наблюдения в других районах показывают, что поток вод на шельф прямо связан с присутствием вихрей на континентальном склоне (Okkonen, 1996). Известно, что антициклонические вихри существенно меняют циркуляцию и термохалинную структуру вод (Okkonen, 1996; Рогачев, Шлык, 2009; Rogachev et al., 2007). Кроме того, процесс формирования вихрей в заливе отражает изменение ветрового воздействия (Рогачев, Шлык, 2011).

Для определения доминирующих физических процессов, влияющих на динамику вод в заливе, в настоящей работе использованы спутниковые данные вместе с прямыми наблюдениями за термохалинной структурой вод, уровнем моря и те-

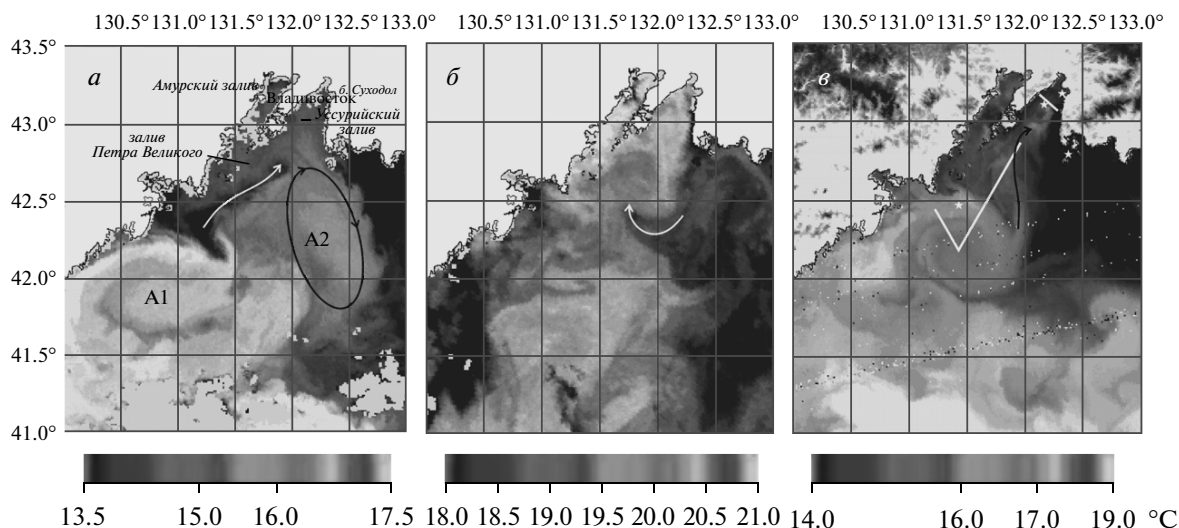


Рис. 1. Район исследований, и положение антициклонических вихрей в разные годы: *а* – данные от 14.09.2007 г. (черными стрелками показана схема циркуляции вод); *б* – поле поверхностной температуры по данным NOAA-18 от 08.09.2008 г.; *в* – поле поверхностной температуры по данным NOAA-17 от 22.09.2009 г.

чениями. Приводятся временные ряды температуры, солености, и скорости течения, для того чтобы определить механизм обновления придонных вод в нижнем слое Уссурийского залива. Именно высокая температура нижнего слоя может привести к значительному уменьшению концентрации растворенного кислорода. Однако механизм, ответственный за обновление вод залива до сих пор не установлен. Возможным механизмом может служить подъем вод вверх по склону шельфа, созданный динамикой вихрей. Поэтому в настоящей работе рассматриваются характеристики антициклонических вихрей, для того чтобы определить их роль в динамике вод залива.

ДАННЫЕ И МЕТОД

Спутниковые наблюдения включают данные спутников серии NOAA, Aqua и Terra, предоставленные Центром коллективного пользования регионального спутникового мониторинга ДВО РАН. Для того чтобы понять динамику вод, в дополнение к этим данным выполнены измерения течений, температуры, придонного давления и солености. Для измерения придонного давления использовался измеритель уровня моря WLR Aandegaa. Для регистрации течений использовались электромагнитные измерители течений S4 Interosean на заякоренных буйах. Зондирования выполнялись СТД-зондом SBE-19. Наблюдения были выполнены в 2007–2011 гг. Постановка буйа с измерителями течений позволила определить характеристики течений Уссурийского залива. Район работ, положение выставленных буйа с измерителями течений и части станций показаны на рис. 1. Глубина постановки буйа в бухте Суходол

в 2010–2011 гг. составляла 13 м, а измерителей течений и давления в центральной части Уссурийского залива – 43 м. Инструмент S4ADW в бухте располагался на глубине 7 м, и поэтому его данные отражают течение в промежуточном слое. Буй в проливе Аскольд был выставлен на глубине 30 м, а инструмент S4 Interosean располагался на горизонте 7 м. Данные о скорости ветра, атмосферном давлении, и температуре воздуха получены на сайте www.rp5.ru.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спутниковые наблюдения

Антициклонические вихри диаметром около 100 км регулярно присутствуют у континентального склона. Их положение в разные годы показано на рис. 1, 2.

На рис. 1 показан антициклонический вихрь с центром $42^{\circ}20'$ с.ш., $131^{\circ}30'$ в.д., который формирует струю теплой воды, проникающую в Уссурийский залив. В юго-восточной части Уссурийского залива хорошо видна область пониженной температуры. Холодное вторжение в область вихря видно на $42^{\circ}30'$ с.ш., $131^{\circ}45'$ в.д. Положение буйа показано звездами. Широкими линиями показаны разрезы со станциями, часть из которых приведена на рис. 4.

Вихрь A1 диаметром около 100 км с центром на $41^{\circ}45'$ с.ш., $131^{\circ}45'$ в.д. в 2007 г. был расположен в западной части залива Петра Великого. К востоку от него находился вихрь A2, который имел меньший размер и эллиптическую форму. Данные 2007 г. приведены в связи с тем, что положение вихрей A1 и A2 в этот год было приблизительно таким же, как в 2008 г. Динамика вихрей в сентяб-

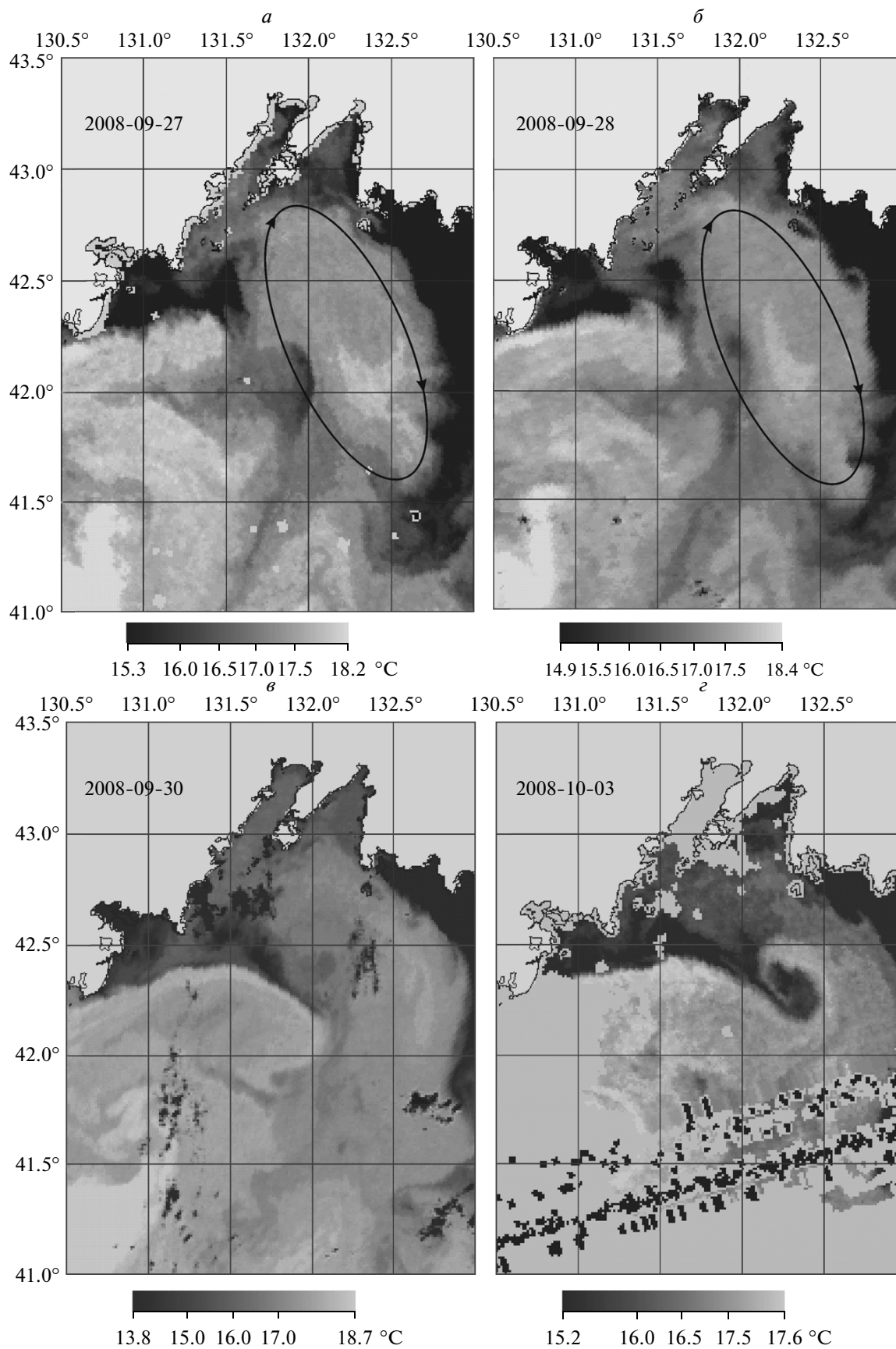


Рис. 2. Динамика антициклонических вихрей А1 и А2 в 2008 г.: *a* – 27.09.2008 г.; *б* – 28.09.2008 г.; *в* – 30.09.2008 г.; *г* – 03.10.2008 г.

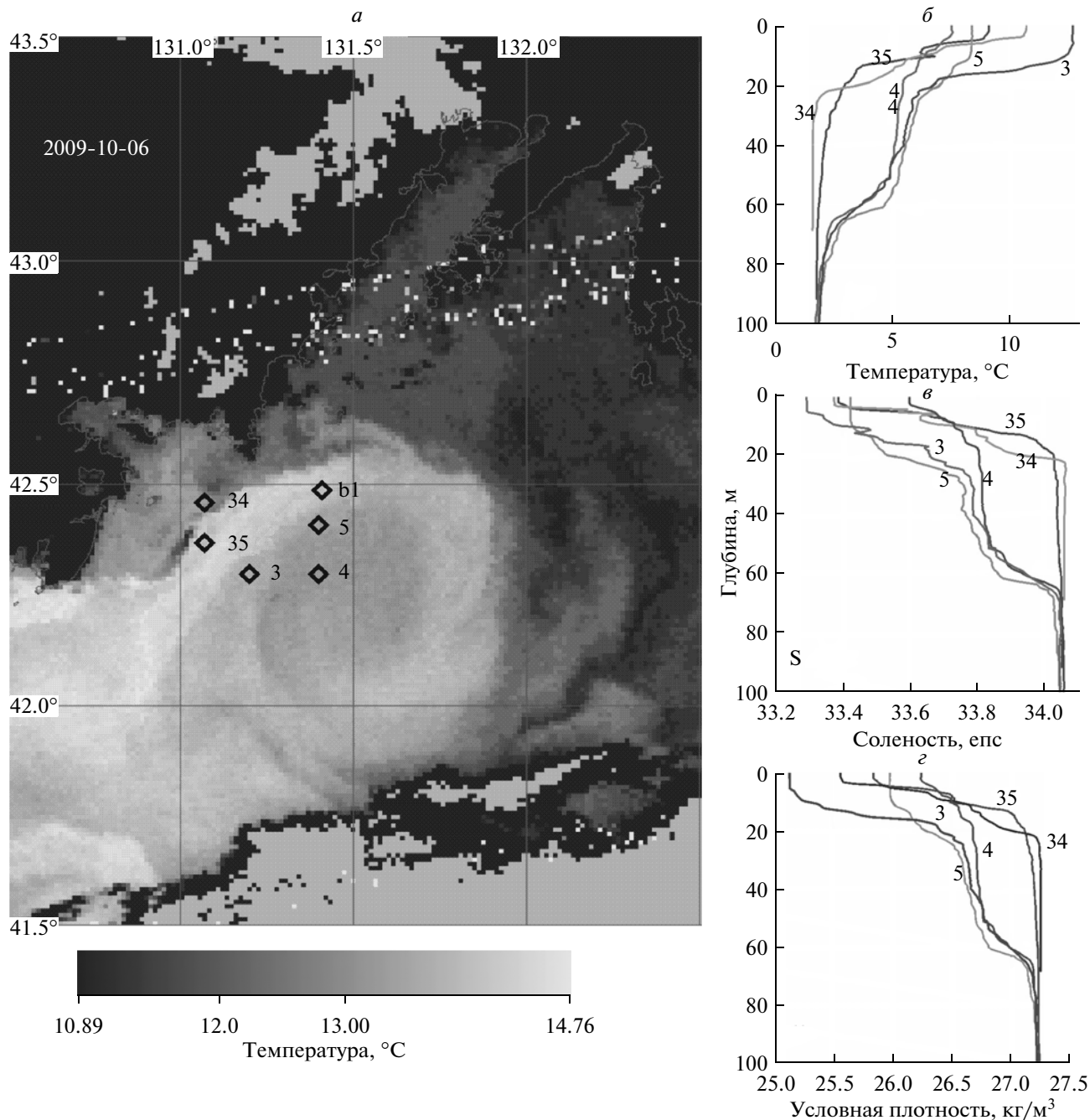


Рис. 3. Вертикальная структура температуры, солёности и плотности в антициклоническом вихре A1 в 2009 г.: *a* – антициклонический вихрь в поле поверхностной температуры 06.10.2009 г. по данным NOAA и положение станций в области вихря 04.11.2009 г.; и вертикальные профили: *б* – температуры; *в* – солёности; *г* – плотности.

ре–октябре 2008 г. показана на рис. 2. Струя теплых вод шириной около 20 км смещалась на восток вдоль 42°15' с.ш. (рис. 2*a, б*), восточная граница вихря A2 также двигалась на восток вдоль 42°30' с.ш. Однако к северу от этой теплой струи хорошо выражена струя холодных вод, направленная от 42°30' с.ш., 131°30' в.д. к Уссурийскому заливу (рис. 2*a*). Особенно хорошо она выражена на рис. 1*a*. Между вихрями A1 и A2 был сформиро-

ван переходный циклонический вихрь диаметром 25 км с центром 42°15' с.ш., 132°15' в.д. (рис. 2*в, г*). Температура воды на поверхности вихря A2 в конце сентября составляла около 18°C, в то время как в холодной области к востоку от пролива Аскольд температура была на 13°C ниже. Температура воды в теплой струе вихря A1 была более 18°C. Северная часть вихря A2 (рис. 2) захватывала Уссурийский залив. По северной границе вихрей A1 и

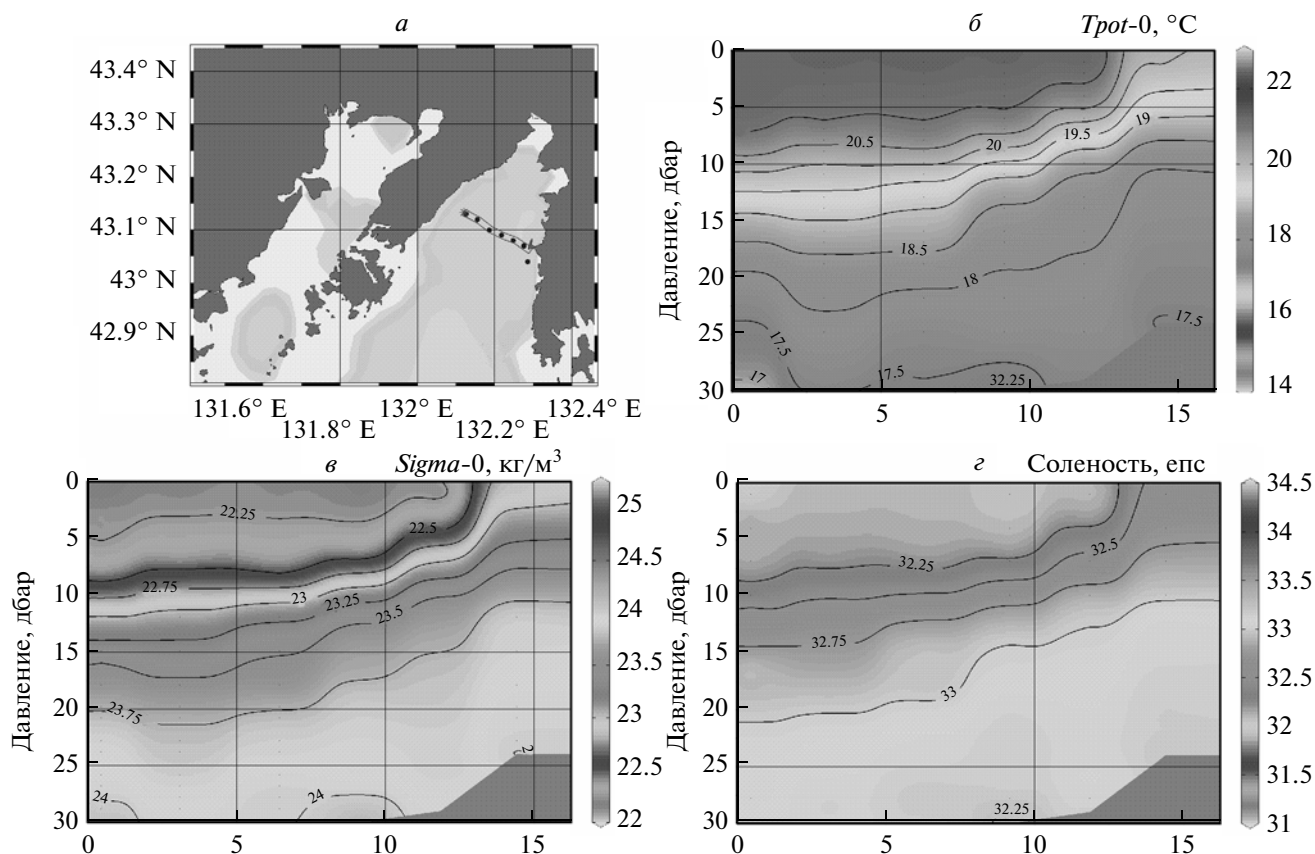


Рис. 4. Поперечные разрезы потенциальной температуры, солёности и плотности в Уссурийском заливе 12.09.2008 г.

А2 в Уссурийский залив распространялись струи холодной воды (рис. 1а, 2а). В сентябре 2008 г. холодная струя распространялась по границе антициклонического вихря и проникала далеко в Уссурийский залив (рис. 1б). Положение вихря А1 в 2009 г. и вертикальные профили его характеристик показаны на рис. 3.

Прямые океанографические наблюдения

Приливные течения в Уссурийском заливе не являются определяющими процессами, поскольку достаточно слабы. Прилив является неправильным полусуточным. Диапазон колебаний уровня моря в глубокой части Уссурийского залива достигает 45 см и превышает диапазон изменений уровня моря в бухте Суходол. Отношение амплитуд суточных ($K1$ и $O1$) и полусуточных ($M2$ и $S2$) гармоник составляет 1.05 в Уссурийском заливе и 1.2 в бухте Суходол. Выраженный двухнедельный цикл изменений уровня моря связан с модуляцией двух суточных гармоник. Этот двухнедельный цикл подавляется льдом в бухте Суходол зимой, но остается хорошо выраженным в северной части Уссурийского залива, не покрытого льдом.

Благодаря сезонному ходу температуры и речному стоку, в теплый период года в заливе уста-

навливается устойчивая стратификация. Однако степень стратификации сильно меняется в разные годы и существенно зависит от сезона. Особенностью 2008 г. были необычно высокие значения температуры и низкие значения солёности воды в Уссурийском заливе. В период с июля по начало сентября 2008 г. температура нижнего слоя Уссурийского залива заметно превышала значения в последующие годы (рис. 4), а солёность была значительно понижена. Так, температура верхнего слоя в начале сентября достигала 21°C, а солёность нижнего слоя была около 33.2 eps. Особенно выразительным стали рост температуры и понижение солёности в придонном слое (рис. 4б). Температура в начале сентября 2008 г. в придонном слое превышала 17°C, а солёность составляла около 33 eps, что является очень низким значением (рис. 4з). При этом солёность была низкой от поверхности до дна. Из-за низкой солёности и высокой температуры в этот период наблюдались низкие значения условной плотности. Значения условной плотности в придонном слое составили около 24 кг/м³, и 22–23 кг/м³ в верхнем слое (рис. 4в). Низкие значения солёности и плотности, вместе с высокими значениями температуры, были близки к соответствующим значениям верхнего слоя в области антициклониче-

ских вихрей, расположенных у континентального склона залива Петра Великого (рис. 1, 3). Самый верхний слой антициклонического вихря содержит теплую воду низкой солености и плотности, ниже которого расположено собственно ядро вихря (рис. 3). При этом, значения температуры верхнего 10-м слоя намного (на 7°C) превышают соответствующие значения в ядре вихря, и на 10°C превышают температуру нижнего слоя. А соленость верхнего слоя, наоборот, намного ниже (на 0.5 епс), чем в ядре самого вихря. Благодаря низким значениям солености и высокой температуре в заливе наблюдалась пониженная стратификация и потенциальная завихренность. Известно, что низкая потенциальная завихренность характерна для антициклонических вихрей (Okkonen, 1996; Rogachev, 2000). Наблюдения, сделанные в последующие годы (2009–2011 гг.) показали понижение температуры на шельфе и значительный рост солености и плотности.

Понижение температуры в сентябре 2008 г. произошло очень быстро за период с 16 по 22 сентября (рис. 5–6). Поперечный разрез, выполненный 29 сентября 2008 г., указал на значительные изменения термохалинной структуры вод, произошедшие в конце сентября (рис. 5). Температура придонного слоя упала на $\sim 15^{\circ}\text{C}$, соленость выросла на 1 епс, а плотность в придонном слое выросла до 27 кг/м^3 . Быстрое падение температуры и рост солености привели к повышению условной плотности на 3 кг/м^3 за четыре дня. Быстрое понижение температуры, рост солености и плотности стало наиболее выразительным событием в середине сентября 2008 г. В результате изменения гидрологической структуры вод произошла смена знака наклона пикноклина. А именно, изопикна 25 кг/м^3 поднялась до 9 м на западном берегу и погрузилась на 15 м на восточном берегу Уссурийского залива. Падение температуры в нижнем слое составило $15\text{--}16^{\circ}\text{C}$ и означало полное обновление воды нижнего слоя. Быстрая вентиляция нижнего слоя должна привести к существенному изменению концентрации растворенного кислорода. В чем причина такой изменчивости? Какой процесс отвечает за быстрое (за время около трех дней) понижение температуры, и тем самым за вентиляцию нижнего слоя залива? Присутствие антициклонического вихря А2 позволяет заключить, что наиболее вероятным механизмом обновления вод является адвекция холодных вод из глубокой части шельфа по западной границе антициклонических вихрей (рис. 1а, б). Наблюдения за течениями в самом Уссурийском заливе и в проливе Аскольд (на восточной границе вихря А2) показали сильный устойчивый поток со скоростью около 50 см/с (рис. 7). Средняя скорость на северо-восточной границе вихря А2 в начале октября составила 25 см/с . Такая скорость обеспечивает смещение объема воды на 50 км за три

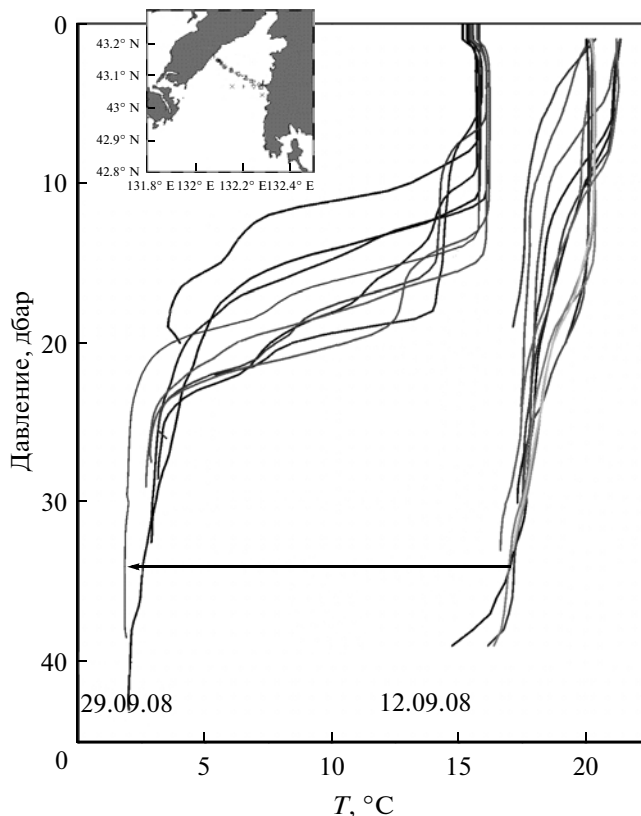


Рис. 5. Вертикальные профили температуры в Уссурийском заливе в сентябре 2008 г.

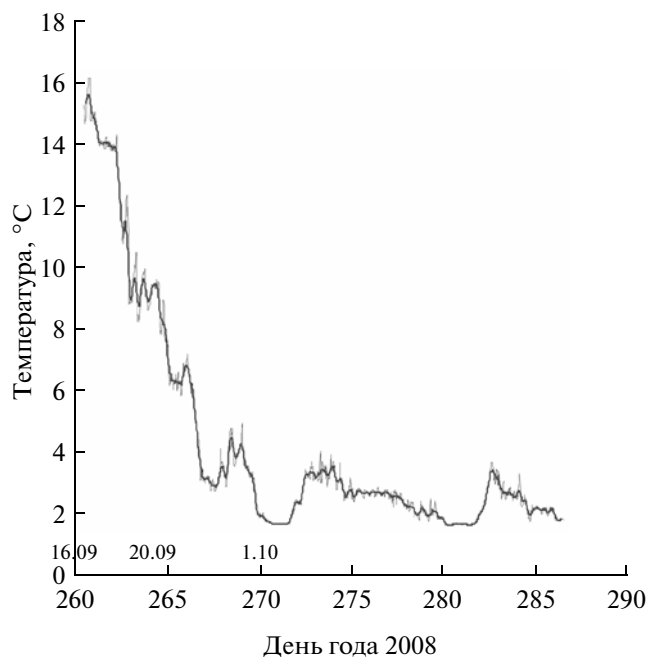


Рис. 6. Изменение температуры в центральной части Уссурийского залива в сентябре 2008 г. по данным буя (положение буя показано на рис. 1в).

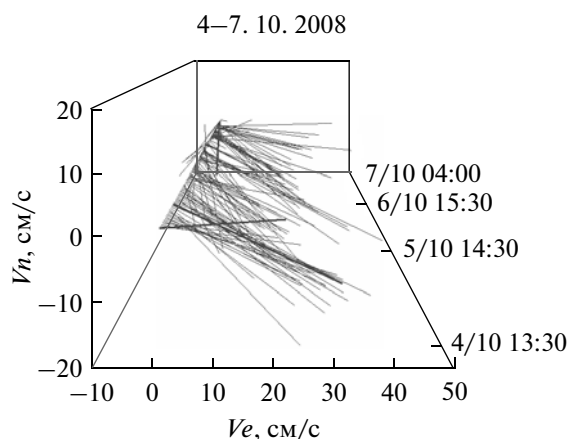


Рис. 7. Скорость течения на северо-восточной границе антициклонического вихря А2 04.10–07.10.2008 г. (положение буя показано на рис. 1а).

дня, что является достаточным для подъема вод от границы шельфа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдения за динамикой антициклонических вихрей позволили установить необычно высокие значения температуры в Уссурийском заливе в 2008 г. Заметный рост температуры вод Уссурийского залива нижнего слоя в 2008 г. составил около 15°C , а понижение солёности — около 0,5 епс. Наблюдения в последующие годы (2009–2011 гг.) выявили понижение температуры и значительный рост солёности в придонном слое. Высокая температура и низкая солёность придонных вод в 2008 г. связаны с динамикой антициклонических вихрей. В середине сентября 2008 г. в Уссурийском заливе произошло быстрое понижение температуры и рост солёности. Для определения механизма таких быстрых изменений, существенно влияющих на свойства вод в заливе, в настоящей работе использованы спутниковые и прямые наблюдения за термохалинной структурой вод и течениями. Спутниковые наблюдения указывают на регулярное присутствие антициклонических вихрей диаметром около 100 км на континентальном склоне залива Петра Великого. Ядро таких вихрей (20–100 дбар) содержит теплую воду ($\sim 14\text{--}18^{\circ}\text{C}$) низкой солёности и плотности. Динамика вод в заливе в значительной степени находится под воздействием антициклонических вихрей, формирующих струи на своей границе. Спутниковые данные указывают на распространение струй по границе вихря и затем непосредственно в Уссурийский залив. Значения температуры и солёности, определенные в июле, августе и сентябре в Уссурийском заливе, соответствуют верхнему слою антициклонического вихря, располагавшемуся на границе шельфа. Присутствие

вихрей А1 и А2 позволяет заключить, что наиболее вероятным механизмом обновления воды в заливе является адвекция холодных вод из глубокой части шельфа по западной границе антициклонических вихрей. Наблюдения за течениями в заливе Петра Великого, в самом Уссурийском заливе и проливе Аскольд позволяют подтвердить этот механизм. Например, наблюдения в проливе Аскольд (на восточной границе вихря А2) показали сильный устойчивый поток со скоростью около 50 см/с, со средней скоростью 25 см/с. Величина скорости соответствует смещению массы воды на 50 км в течение трех дней, что является достаточным для подъема вод от границы шельфа. Остается неясным механизм формирования этого потока, что может быть предметом следующих исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-ДВО 11-05-98508-р_восток_a.

Автор признателен А.А. Воронину и П.А. Салюку за помощь в море и П.Е. Щербинину за полезные советы при обработке данных.

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. малакологич. 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.
- Будаева В.Д., Зуенко Ю.И., Макаров В.Г. Структура и динамика вод залива Петра Великого в условиях сильного летнего распреснения (2008–2009 гг.) // Тр. ДВНИГМИ. 2010. Юбилейный вып. С. 158–172.
- Гаврилова Г.С., Кучерявенко А.В. Товарное выращивание дальневосточного трепанга *Apostichopus japonicus* в заливе Петра Великого: методические особенности, результаты работы хозяйства марикультуры в бухте Суходол // Изв. ТИНРО. 2010. Т. 162. С. 342–354.
- Гаврилова Г.С., Кучерявенко А.В., Косых М.М. Восстановление скоплений дальневосточного трепанга методами марикультуры на примере бухты Суходол (залив Петра Великого, Японское море) // Современное состояние водных биоресурсов: Мат. науч. конф., посвященной 70-летию С.М. Коновалова. Владивосток: ТИНРО-центр, 2008. С. 717–720.
- Олифиренко А.Б. Условия формирования поселений двустворчатого моллюска *Anadara broughtoni* в зал. Петра Великого (Японское море) // Изв. ТИНРО. 2007. Т. 149. С. 122–137.
- Седова Л.Г., Калинина М.В., Соколенко Д.А. Влияние запрета промысла на состояние поселения анадары в Уссурийском заливе (залив Петра Великого, Японское море) // Изв. ТИНРО. 2009. Т. 159. С. 101–108.
- Рогачев К.А., Шлык Н.В. Изменение характеристик халоклина и рост температуры в Камчатском течении и Ойясио // Океанология. 2009. Т. 49. № 6. С. 814–819.

Rogachev K.A., Shlyk N.V. Антициклоническая циркуляция вод Амура в Сахалинском заливе по спутниковым и морским наблюдениям // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 6. С. 73–79.

Okkonen S. The influence of an Alaskan Stream eddy on flow through Amchitka Pass // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. № C4. P. 8839–8851.

Rogachev K.A. Rapid thermohaline transition in the Pacific western subarctic and Oyashio fresh core eddies // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. № C4. P. 8513–8526.

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. P. II: Topical Studies in Oceanogr. 2007. V. 54. № 23–26. P. 2643–2656.

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. V. 52. P. 489–503.

Welch D.W., Ishida Y., Nagasawa K. Thermal limits and ocean migrations of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*): Long-term consequences of global warming // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1998. V. 55. P. 937–948.

Dynamics of Anticyclonic Eddies and Rapid Ventilation of Bottom Waters in the Ussury Bay, Sea of Japan

K. A. Rogachev

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok

Water circulation of the Ussury Bay was studied using satellite images, direct current measurements and conductivity-temperature-depth surveys. This study combines satellite data with in situ observations to examine the cause of strong variability in this coastal ecosystem. Mesoscale eddies and associated submesoscale streamers are important features of the region. We show that significant warming observed in 2008 likely due to penetration of warm low salinity submesoscale streamers from the slope region. These events establish the advection of warm water from the slope region and determine the thermal properties of the near bottom layer. Near bottom temperatures observed in 2008 were at least 15 degrees C higher than in consecutive years. Therefore, the rapid water exchange with the slope region determines water properties. The increased temperature in combination with increased organic matter to the seafloor may cause oxygen deficits in the basin.

Keywords: anticyclonic eddies, ventilation of bottom waters, Ussury bay