

Антициклоническая циркуляция в заливе Академии (Охотское море), определенная по спутниковым данным радиометров MODIS и AVHRR

К.А. Рогачев¹, Е.В. Фомин², Н.В. Шлык¹

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041 Владивосток, Балтийская, 43
E-mail: rogachev@poi.dvo.ru

²Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН
690041 Владивосток, Радио, 5

Для определения доминирующих физических процессов, влияющих на циркуляцию вод в заливе Академии (Охотское море) использованы спутниковые и прямые наблюдения за течениями. Спутниковые наблюдения включают изображения видимых каналов радиометра AVHRR (спутники серии NOAA), а также изображения 1-го канала радиометра MODIS (спутники Aqua и Terra) с разрешением 250 метров. Спутниковые данные вместе с измерениями течений на буйковых станциях выявили антициклоническую циркуляцию в заливе на поверхности с периодом около трех дней. На основе этих наблюдений, показано, что циркуляция является эстуарной.

Ключевые слова: спутниковые наблюдения, дрейф льда, Охотское море, полярные киты, залив Академии.

Введение

Залив Академии расположен в западной части Охотского моря, где в ряде районов наблюдаются исключительно большие приливы и сильные приливные течения (рис. 1). Охотское море является высокопродуктивным морем, расположенным вблизи самого холодного места на Азиатском континенте. Система средних течений переносит дрейфующий лед в заливы Шантарского архипелага, где он сохраняется вплоть до середины июля. Залив Академии и прилегающие к нему заливы Шантарского архипелага являются важным местом питания полярных китов (*Balaena mysticetus*) [1, 2]. Система течений и адвекция холодной воды из северной части Охотского моря, являются важными процессами, которые поддерживают богатую экосистему залива Академии. Такая экосистема включает арктические виды зоопланктона (*Calanus glacialis*, *Limacina helicina*), которые всегда являлись пищей для полярных китов (*Balaena mysticetus*) в других районах их обитания. Следствием высокой концентрации арктических видов зоопланктона было существование в районе китобойного промысла в 19 и 20 веках [1]. Вместе с тем, залив Академии не является районом очень высокой первичной продукции. Одна причина высокой концентрации арктических организмов связана с их концентрацией приливными течениями, которые создают среднюю циркуляцию и переходные вихри, приводящие к скоплению планктона в определенных местах.

Наблюдения за приливами и приливными течениями в Охотском море показывают, что их амплитуда значительно растет к западу от 142° в.д. и достигает максимальных значений в заливах Шантарского архипелага [3, 4].

Амплитуда полусуточного прилива в Сахалинском заливе (53°18'с.ш. 141°25'в.д.) в пять раз меньше амплитуды полусуточного прилива в заливе Академии. Сильные приливные течения в регионе приводят к значительной диссипации приливной энергии [5, 6]. Сильные приливные

течения являются основным механизмом, вызывающим разрушение и таяние льда в этой части моря. В свою очередь, быстро тающий лед понижает соленость верхнего слоя моря. Кроме тающего льда, источником вод низкой солености являются впадающие в залив большие реки. Учитывая значительный сток пресной воды, залив можно рассматривать как район с сильным влиянием речного стока. Поэтому, можно полагать, что на течения в заливе значительное влияние оказывает эстуарная (гравитационная) циркуляция. Действительно, океанографические наблюдения, выполненные в летнее время, показали сильную стратификацию и струю вод низкой солености, связанную со стоком рек.

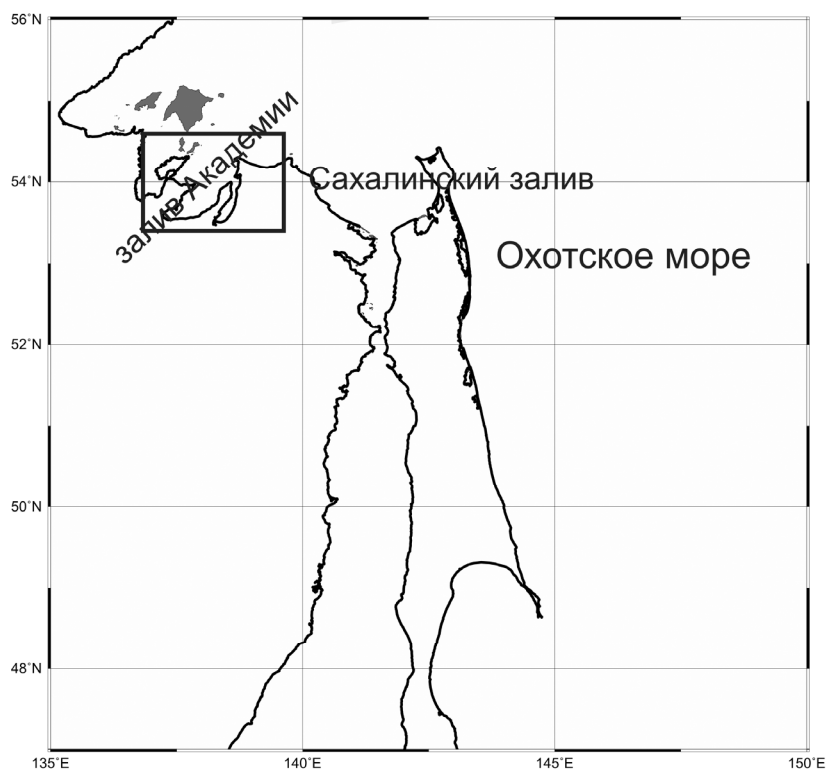


Рис. 1. Район исследований

Вместе с тем, экспериментальных исследований циркуляции бассейна до сих пор не проводилось. В этой статье мы представляем первые результаты наблюдений средней (остаточной) циркуляции вод, основанной на спутниковых наблюдениях. Результаты прямых наблюдений сопоставляются с существующими моделями и прямыми наблюдениями за течениями, которые позволяют установить природу циркуляции в заливе.

Материалы и методы

Спутниковые наблюдения включают изображения видимых каналов радиометра AVHRR (ИСЗ серии NOAA), предоставленные ЦКП регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН. Для отслеживания траекторий отдельных льдин использовались данные 1-го канала радиометра MODIS (пространственное разрешение 250 метров). Использовались изображения со спутников Aqua и Terra в формате Level-1B, свободно-распространяемые через систему LAADS (Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System). Для каждого из трех дней за 26, 28 и 29 июня 2007 года были выбраны по 2 изображения, интервал между которыми составляет около полутора часов. С помощью программного комплекса SeaDAS по этим изображениям были построены меркаторские проекции, включающие залив Академии. Чтобы определить скорости перемещения отдельных льдин использовался метод

морских маркеров [7]. Для этого были выбраны две крупные льдины, которые отчетливо видны в каждый из трех дней. Для каждой пары изображений, соответствующих одному дню наблюдений, были построены вектора перемещений льдин и рассчитаны их скорости.

Детальные наблюдения за течениями и гидрологической структурой были выполнены зондом *Seabird 19*. Течения были измерены путем постановки заякоренных буев с измерителями течений *S4 Interocean*. Материалы были собраны в двух экспедициях ТОИ ДВО РАН, выполненных НИС *Луговое* в 2003-2004 гг. В ходе этих работ выполнялись две детальные СТД съемки в заливе. Постановка буев с измерителями течений и уровня позволила получить данные о течениях и наблюдения за приливами.

Результаты наблюдений

Измерения течений показали существование антициклонического вихря диаметром около 40 км в южной части залива. Спутниковые наблюдения, основанные на регулярных данных, принимаемых региональным центром спутниковой информации ИАПУ ДВО РАН, также выявили антициклонический вихрь в заливе (рис. 2). Траектория отдельных льдин позволила определить скорость течения на поверхности и период циркуляции в антициклоническом вихре, которая составила около 3 дней. Скорость течения на поверхности, определенная по спутниковым наблюдениям, составила около 0.3 м/с. Максимальная величина скорости дрейфа составила 0.55 м/с.

Наблюдения за приливными течениями показали, что их амплитуда существенно понижалась к вершине залива (к югу от 54° С). В свою очередь, стратификация вод значительно понижалась к северу от антициклонического вихря. Низкая стратификация в северной части залива была связана с сильными приливными течениями и приливным перемешиванием. Степень перемешивания определяется скоростью приливного течения в третьей степени. Поэтому амплитуда скорости около 80 см с^{-1} достаточна, для того чтобы поддерживать низкую стратификацию слоя глубиной около 25-30 м в северной части залива.

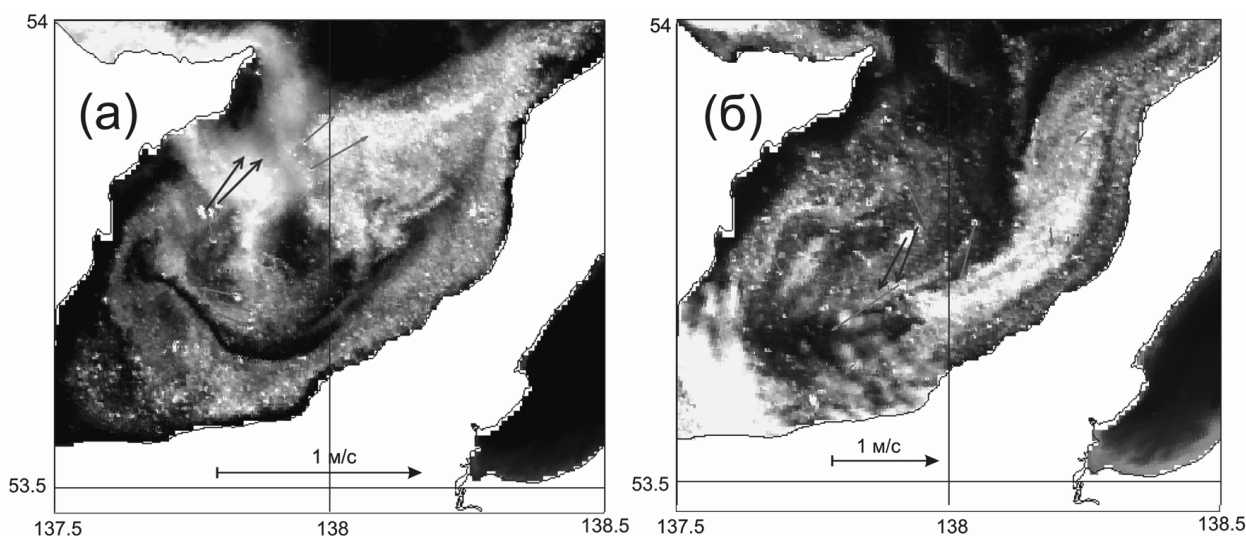


Рис. 2. Скорость дрейфа отдельных льдин, определенная методом морских маркеров. Средняя скорость для двух выделенных векторов, составила соответственно: (а) 26.06.2007, 01:45 UTC – 0.31 м/с; (б) 28.06.2007, 01:30 UTC – 0.55 м/с

Обсуждение

Наблюдения показывают, что стратификация определяется речным стоком либо тающим льдом. Вместе с тем, как в нижнем, так и в верхнем слое средние течения определяются гравитационной циркуляцией. Скорость течения гравитационной циркуляции меньше, чем

скорость приливного течения или течения во время действия умеренного ветра. Однако гравитационная циркуляция работает длительное время и поддерживается значительной разностью уровня между разными частями эстуария. Эстуарная или гравитационная циркуляция – это устойчивая средняя циркуляция и представляет собой концепцию идеальной циркуляции. В реальности многие другие факторы меняют гравитационную циркуляцию и создают разное распределение плотности и, тем самым, потока вод.

Трехмерная циркуляция в заливе может быть разделена на продольную (по оси залива) и поперечную. Продольная циркуляция важна, прежде всего, для переноса льда, планктона и соленой воды. Многие исследования показывают, что структура течений в области сильного влияния стока пресной воды является трехмерной [6, 8]. Именно поэтому поперечная структура течений важна также как и продольная циркуляция. Например, работе [8] показано, что картина течений сильно зависит от числа Экмана. Для малых значений числа Экмана ($E < 0.01$) геострофический поток становится основным. В этом случае поток в верхнем слое формирует антициклоническую циркуляцию. Однако такая картина наблюдается при доминировании гравитационной циркуляции. С подветренной стороны мыса следует ожидать особую циркуляцию, связанную с отрывом приливного потока от мыса и формированием так называемой подветренной завихренности.

Гравитационная циркуляция имеет двухслойную структуру. В нижнем слое поток направлен вверх по эстуарию, а в верхнем слое – вниз. Эта структура создана балансом между двумя компонентами продольного градиента давления. Эти два компонента – баротропный и бароклинный градиенты давления. С целью определения природы циркуляции мы рассмотрели аналитическую модель эстуария [2, 8] и адаптировали ее для залива.

Модель использует правостороннюю систему координат (x, y, z) . Для создания циркуляции задан продольный градиент плотности $\partial\rho/\partial x > 0$ и соответствующий продольный отрицательный наклон уровня $\partial\eta/\partial x < 0$. Вода стратифицирована по температуре и солености ($\partial\rho/\partial z < 0$). Наблюдается также поперечный наклон уровня. Наблюдаемый наклон пикноклина направлен вверх и вправо, если смотреть на эстуарий. Одна причина такого распределения плотности связана с тем, что плотная вода распространяется вправо, а легкая вода в верхнем слое – влево. В этом случае наблюдается положительный поперечный градиент плотности ($\partial\rho/\partial y > 0$).

Критический безразмерный параметр – это число Экмана, которое определяется в виде $E = A_z / fH_0^2$, где H_0 – максимальная глубина. Поскольку число Экмана сильно зависит от глубины, оно мало для больших значений H_0 . Выполняется следующее соотношение для числа Экмана и глубины слоя Экмана $d = \sqrt{2EH}$.

Результаты расчета течений получены для разных значений числа Экмана E . Для $d = H/2$, $H = 20$ м, значения параметра Кориолиса 10^{-4} с^{-1} , число Экмана $E = 0.125$, и $A_z = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$. Эти значения соответствуют мелкой части залива. В глубокой части залива число Экмана $E = 0.01$, что соответствует $H/d = 7$. Для значения $H = 28$ м, $d = 4$, коэффициент вертикальной вязкости $A_z = 8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$. Значение горизонтального градиента плотности $\partial\rho/\partial x$ задано постоянным $10^{-4} \text{ кг м}^{-4}$.

Результаты расчета показывают, что в глубокой части залива в нижнем слое течение направлено к западному берегу, а в верхнем слое в противоположную сторону. В мелкой части залива распределение скорости противоположное. В нижнем слое течение направлено от берега, а в верхнем слое к берегу. Поэтому в верхнем слое залива формируется антициклоническая циркуляция. На этом основании мы заключили, что антициклоническая циркуляция является результатом гравитационной циркуляции в заливе.

Заключение

В этой статье на основе спутниковых и прямых наблюдений за течениями, гидрологической структурой вод и аналитической моделью, определена природа циркуляции в заливе Академии Охотского моря. На основе прямых наблюдений установлена антициклоническая циркуляция в заливе с периодом около 3 дней на поверхности.

Настоящая работа основана на результатах долговременных спутниковых наблюдений и морской экспедиции, выполненной НИС *Луговое* в заливе Академии, Охотское море, в июле-августе 2004 г. Полевые работы позволили собрать наблюдения за основными физическими процессами и их воздействием на прибрежную экосистему в заливе. Экспедиции НИС *Луговое* в залив Академии были выполнены Тихоокеанским океанологическим институтом.

Литература

1. *Дорошенко Н.В.* Гладкие киты Охотского моря // Изв. ТИНРО, 1996. Т. 121. С.14-25.
2. *Rogachev K.A., Carmack E.C., Foreman M.G.* Bowhead whales feed on plankton concentrated by estuarine and tidal currents in Academy Bay, Sea of Okhotsk // *Continental Shelf Research*, 2008. Vol. 28. P. 1811-1826. Doi: 10.1016/j.csr.2008.04.014.
3. *Kowalik Z., Polyakov I.* Tides in the Sea of Okhotsk // *J. Phys. Oceanogr.*, 1998. Vol. 28. P.1389-1409.
4. *Rogachev K.A., Carmack E.C., Salomatin A.S.* Strong tidal mixing and ventilation of cold intermediate water at Kashevarov Bank, Sea of Okhotsk // *J. Oceanogr.*, 2000. Vol. 56. P.439-447.
5. *Shcherbina A.Y., Talley L.D., Rudnick D.L.* Dense water formation on the northwestern shelf of the Okhotsk Sea: 1. Direct observations of brine rejection // *J. Geophys. Res.*, 2004. Vol. 109. C09S08. Doi: 10.1029/2003JC002196.
6. *Fujiwara T., Fukui S., Sanford L.P., Nakatsuji K., Sugiyama Y.* Anticyclonic circulation driven by the estuarine circulation in a gulf type ROFI // *J. Mar. Sys.*, 1997. Vol. 12. P.83-99.
7. *Hatakeyama Y., Tanaka S., Sugimura T., Nishimura T.* Surface currents around Hokkaido in the late fall of 1981 obtained from analysis of satellite images // *J. Oceanographical Society of Japan*, 1985. Vol. 41. P.327-336.
8. *Kasai A., Hill A.E., Fujiwara T., Simpson J.H.* Effect of the Earth's rotation on the circulation in regions of freshwater influence // *J. Geophys. Res.*, 2000. 105 (C7). P.16961-16969.

Anticyclonic circulation in Academy Bay, Sea of Okhotsk determined from satellite data

K.A. Rogachev¹, E.V. Fomin², N.V. Shlyk¹

¹ *V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute*
E-mail: rogachev@poi.dvo.ru

² *Institute for Automation and Control Processes*

To define the dominant physical processes leading to the anticyclonic circulation in the Academy Bay, satellite data were collected. This paper combine satellite observations with physical (CTD, currents) measurements to examine the nature of circulation. We are testing the hypothesis that strong currents and headland-associated eddy are important processes for accumulation of biota. Residual currents in the Bay are investigated using direct velocity measurements from current meters installed on moorings. In situ observations, that include conductivity-temperature-depth (CTD) data and measurements of currents, are used to study the nature of estuarine circulation. Results show that the flow pattern is determined by river discharge and ice melting.

Keywords: satellite data, ice-drift, Sea of Okhotsk, whales, Academy Bay.