

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

### АНТИЦИКЛОНИЧЕСКАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ ВОД АМУРА В САХАЛИНСКОМ ЗАЛИВЕ ПО СПУТНИКОВЫМ И МОРСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ

© 2011 г. К. А. Рогачёв\*, Н. В. Шлык

*Учреждение Российской академии наук Тихоокеанский океанологический институт  
им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток,*

*\*E-mail: rogachev@poi.dvo.ru*

Поступила в редакцию 10.11.2010 г.

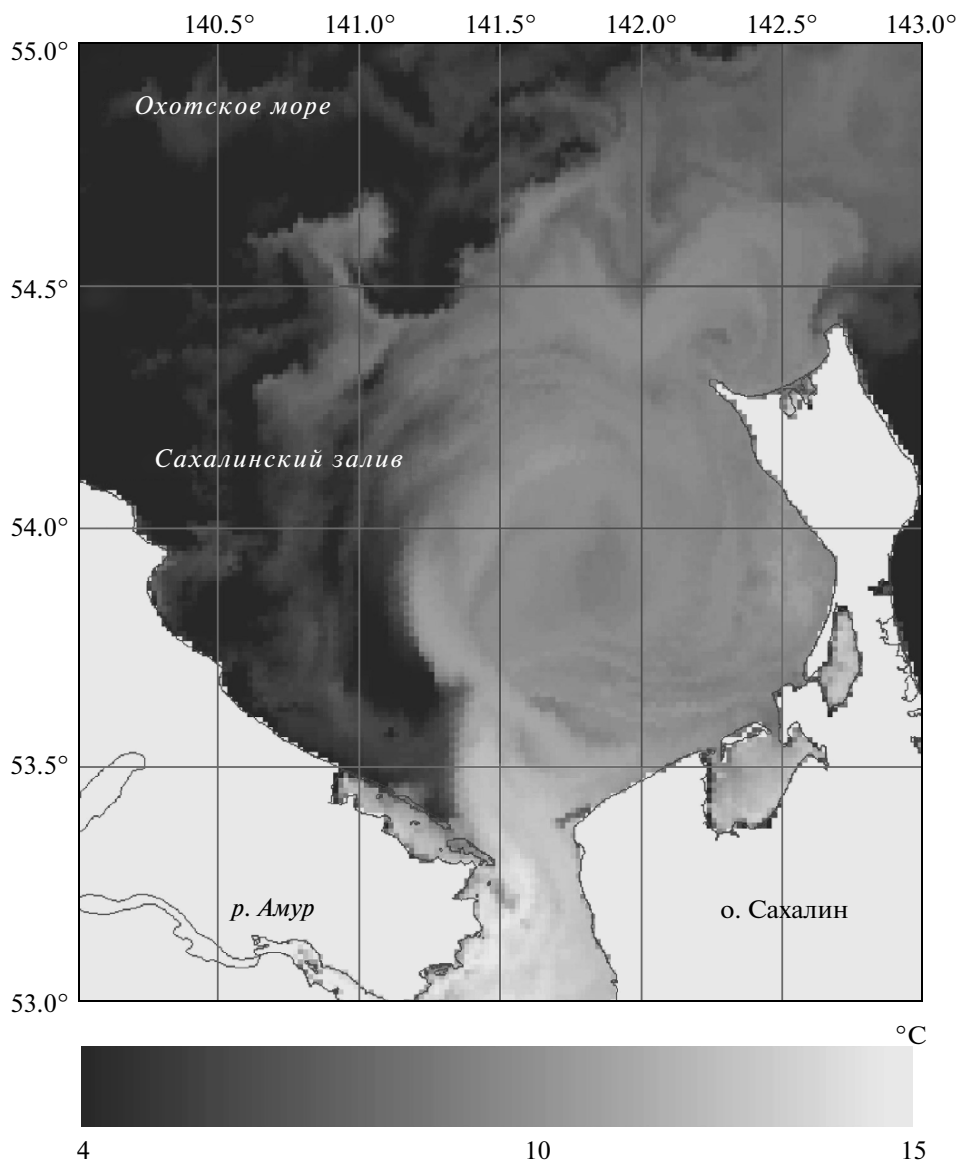
Экспериментальные исследования циркуляции вод Сахалинского залива до сих пор не проводились. В настоящей работе сопоставлены спутниковые наблюдения и дрейф поверхностных буев. Используются данные видимых каналов радиометра AVHRR с пространственным разрешением 1.1 км (спутники серии NOAA), а также канала 1 радиометра MODIS с разрешением 250 м (спутники Aqua и Terra). Обработка спутниковых данных проводилась с помощью программных средств, разработанных в Центре коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН. Морские наблюдения включают данные спутниковых буев Argos, любезно предоставленные Экологической компанией Сахалина, и STD-наблюдения, полученные Тихоокеанским океанологическим институтом ДВО РАН в разные годы. Спутниковые наблюдения указывают, что вода, стекающая в Сахалинский залив, формирует антициклоническую циркуляцию. Такая циркуляция накапливает значительную часть речного стока Амура. Начальная скорость стока устанавливает положение выступа вод низкой солености и его последующую динамику. Наблюдения за дрейфующими буями Аргос выявили антициклоническую циркуляцию в заливе на поверхности с периодом около 3–8 дней. Время нахождения дрейфтера в пределах вихря составило около одного месяца. Полученные данные о циркуляции в Сахалинском заливе сравниваются с аналогичными наблюдениями, проведенными нами в смежном к нему заливе Академии. Характеристики циркуляции в заливе Академии получены на основе спутниковых наблюдений за траекторией отдельных льдин и заякоренных буев. Результаты этих наблюдений сопоставлены с простой моделью, что позволяет установить природу циркуляции, и ее основные характеристики.

**Ключевые слова:** Сахалинский залив, Охотское море, спутниковые наблюдения циркуляции Охотского моря

#### ВВЕДЕНИЕ

Сахалинский залив расположен в северо-западной части Охотского моря к востоку от Шантарского архипелага (рис. 1). Глубина моря в заливе равномерно растет с юга на север от нескольких метров в Амурском лимане до 100 м на его северной границе. Гидрологические условия Амурского лимана находятся под влиянием сильных приливных течений. На сегодняшний день характеристики приливных течений в заливе не изучены. Особенно неясна пространственная изменчивость приливных течений. Приливные течения и их воздействие на структуру вод вблизи залива исследовались в работе (Rogachev et al., 2000). Приливные течения в смежном заливе Академии исследовались в работе (Rogachev et al., 2008). Среднегодовой объем стока Амура составляет около 360 км<sup>3</sup>. На теплую часть года (с мая по октябрь) приходится около 90% годового стока (324 км<sup>3</sup>). Спутниковые наблюдения стока Амура указывают, что вода низкой солености, стекаю-

щая в Сахалинский залив, образует антициклонический вихрь. Наблюдения в других антициклонических вихрях устьев больших рек показывают, что такой вихрь может вмещать около 70% речного стока (Horner-Devine, 2006). Как следствие, это приводит к ослаблению речного потока прибрежным течением. Кроме того, эффективное время нахождения воды в вихре может составлять несколько дней, что связано с изменением циркуляции окружающих вод, изменением выноса загрязняющих, взвешенных и растворимых веществ в Охотское море. Вихрь содержит воду с относительно высокой температурой и низкой соленостью и плотностью. Спутниковые изображения дают представление о форме и размерах такого вихря, однако они не могут дать представление о его внутренней структуре и скорости потока в нем - особенно, если эта скорость меняется с глубиной так, как это имеет место в случае гравитационной циркуляции. Кроме того, само существование вихря и накопление им воды низкой солености означает значительное измене-

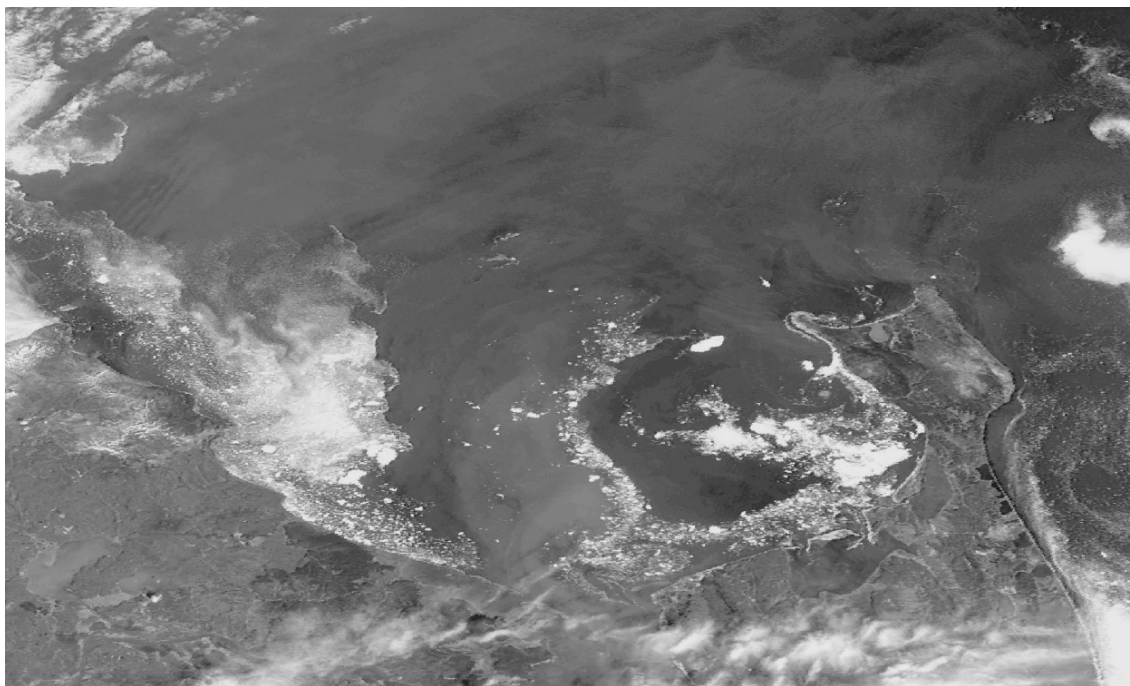


**Рис. 1.** Поле поверхностной температуры по данным спутника NOAA 16 июня 2009 г. Темный цвет соответствует холодной воде.

ние прибрежной циркуляции. Однако причины такого накопления пресной воды оставались неясными.

Учитывая значительный сток пресной воды р. Амур, залив можно рассматривать как эстуарий с сильным влиянием стока пресной воды. Поэтому можно полагать, что на течения в заливе большое влияние оказывает эстуарная (гравитационная) циркуляция. Действительно, океанографические наблюдения, выполненные в летнее время, указывают на сильную стратификацию и струю вод низкой солености, связанную со стоком Амура. Жабин И.А. с соавт. (Жабин и др., 2007) обнаружил поступление вод низкой солености в залив с антициклоническим характером циркуляции. В статье (Rogachev et al., 2008) авторы использовали

прямые измерения течений в смежном к Сахалинскому заливу – заливе Академии – и показали существование антициклонического вихря диаметром около 40 км в его южной части. Поскольку в залив Академии впадает две реки (Сыран и Ульбан), то его можно рассматривать как аналог Сахалинского залива. Спутниковые наблюдения, основанные на регулярных данных, принимаемых Центром коллективного пользования региональному спутниковому мониторингу окружающей среды ДВО РАН, также выявили антициклонический вихрь в заливе. Траектория отдельных льдин позволила определить скорость течения на поверхности и период циркуляции воды в антициклоническом вихре залива Академии, которая составила около 3 дней.



**Рис. 2.** Изображение Сахалинского залива, полученное спутником Aqua в 2002 г. (данные канала 1 MODIS/Aqua и MODIS/Terra с пространственным разрешением 250 м). Мутная вода р. Амур распространяется в западной части Сахалинского залива, формируя антициклоническую циркуляцию.

Вместе с тем экспериментальных исследований антициклонической циркуляции Сахалинского залива до сих пор не проводилось. В настоящей заметке мы представляем первые результаты измерений циркуляции вод, основанной на прямых и спутниковых наблюдениях. Результаты морских наблюдений сопоставляются с простой моделью, что позволяет установить природу циркуляции в заливе и оценить объем пресной воды, накапливаемой антициклоническим вихрем.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Спутниковые наблюдения включают изображения радиометра AVHRR (ИСЗ серии NOAA), предоставленные Центром коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН ([www.satellite.dvo.ru](http://www.satellite.dvo.ru)). Для отслеживания дрейфующего льда и траекторий отдельных льдин использовались данные канала 1 радиометра MODIS (пространственное разрешение 250 м.). Использовались изображения со спутников Aqua и Terra в формате Level-1B, свободно распространяемые через систему LAADS (Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System). С помощью программного комплекса SeaDAS по этим изображениям были построены меркаторские проекции.

Для определения циркуляции вод использовались траектории дрейфтеров Argos, выставленных в заливе в апреле 2009 г. на припайный лед сотрудни-

ком Экологической компании Сахалина В.С. Тамбовским, и предоставленные Е.Н. Морозовым. Для построения траектории дрейфтеров мы располагали их ежечасным положением. Гидрологические данные включают наблюдения, сделанные Тихоокеанским океанологическим институтом ДВО РАН (ТОИ) в разные годы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

На среднюю циркуляцию в заливе в теплый период года оказывает воздействие эстуарный обмен, вызванный речным стоком. Перенос массы такого эстуарного потока зависит от градиента плотности в эстуарии. Сток пресной воды и тающий лед поддерживают стратификацию в заливе. Вместе с тем приливное перемешивание в придонном слое разрушает эту стратификацию. В заливе наблюдается относительно высокая стратификация, вызванная потоком теплой воды на поверхности (рис. 1). В северо-западной части в залив поступает холодная и относительно соленая вода из глубокой части моря. В верхнем слое относительно теплая вода низкой солености распространялась на север. Струя теплых и мутных вод хорошо выделяется на спутниковых изображениях благодаря узкой полосе льда на ее восточной границе (рис. 2). На изображениях видимого канала спутника Aqua видна узкая полоса льда, которая ограничивает струю теплых вод и форми-

рует антициклоническую циркуляцию в Сахалинском заливе.

Три дрейфера Argos были установлены на припайный лед в Сахалинском заливе в апреле 2009 г. Все дрейферы выявили антициклоническую циркуляцию (рис. 3а, 3б). Один из них (89999, рис. 3а) был захвачен этой циркуляцией и совершил несколько оборотов. Диаметр циркуляции для внутреннего дрейфера 89999 составил около 40 км. Однако остальные дрейферы позволили оценить радиус антициклонического вихря величиной около 50 км. При этом время нахождения захваченного антициклонической циркуляцией дрейфера в пределах вихря составило около одного месяца.

Вертикальные профили солености показывают, что стратификация в Сахалинском заливе значительно выше, чем в окружающих водах. В Сахалинском заливе в верхнем слое толщиной около 7–10 м распространяется вода низкой солености ( $S < 20$  епс) и плотности (менее 25 кг/м<sup>3</sup>). При этом значения солености в придонном слое превышают соответствующие значения для смежного залива Академии. Это прямо указывает на проникновение холодной соленой воды из северной части моря в нижнем слое и на значительное влияние стока пресной воды.

Стоковый антициклонический вихрь имеет толщину около 7 м, соленость 7–15 епс, температуру 7–12°C. Резкий слой скачка отделяет эту воду от холодной (~–1.5°C) и соленой воды (~32 епс). Оценку скорости стока можно получить, зная площадь сечения и средний расход Амура.

Простая теория вихря стоковых вод, которые отделены от дна, предполагает, что момент импульса находится в балансе термического ветра. Особенно важно, что в случае формирования вихря, перенос пресной воды вдоль берега может быть ослаблен на 70% от величины речного стока. Перенос стока вдоль берега связывают с числом Россби  $Ro = U/fW$ , где  $U$ ,  $W$ ,  $f$  – средняя скорость, ширина стока и параметр Кориолиса. Число Россби для скорости потока 0.8 м/с и его ширины  $W = 20$  км составляет 0.4. Для низких значений числа Россби основной перенос стоковых вод происходит вдоль берега. Такая концепция полагает, что начальная скорость стока  $U$  и его ширина устанавливают первоначальное положение вихря и его последующую динамику.

Определив радиус вихря по спутниковым данным, можно получить оценки профиля границы раздела  $h$  и объема вихря  $V_b$ . Объем выступа  $V_b$  можно оценить, полагая его параболом радиусом  $R$  и максимальной глубиной  $H$

$$V_b = \frac{\pi R^2 H}{2}.$$

Задав  $H = 7$  м и  $R = 50$  км, получим  $V_b = 28$  км<sup>3</sup>. Этот объем вырастает до 38 км<sup>3</sup> для глубины  $H = 10$  м. Зная распределение солености, можно оценить эквивалентный объем пресной воды

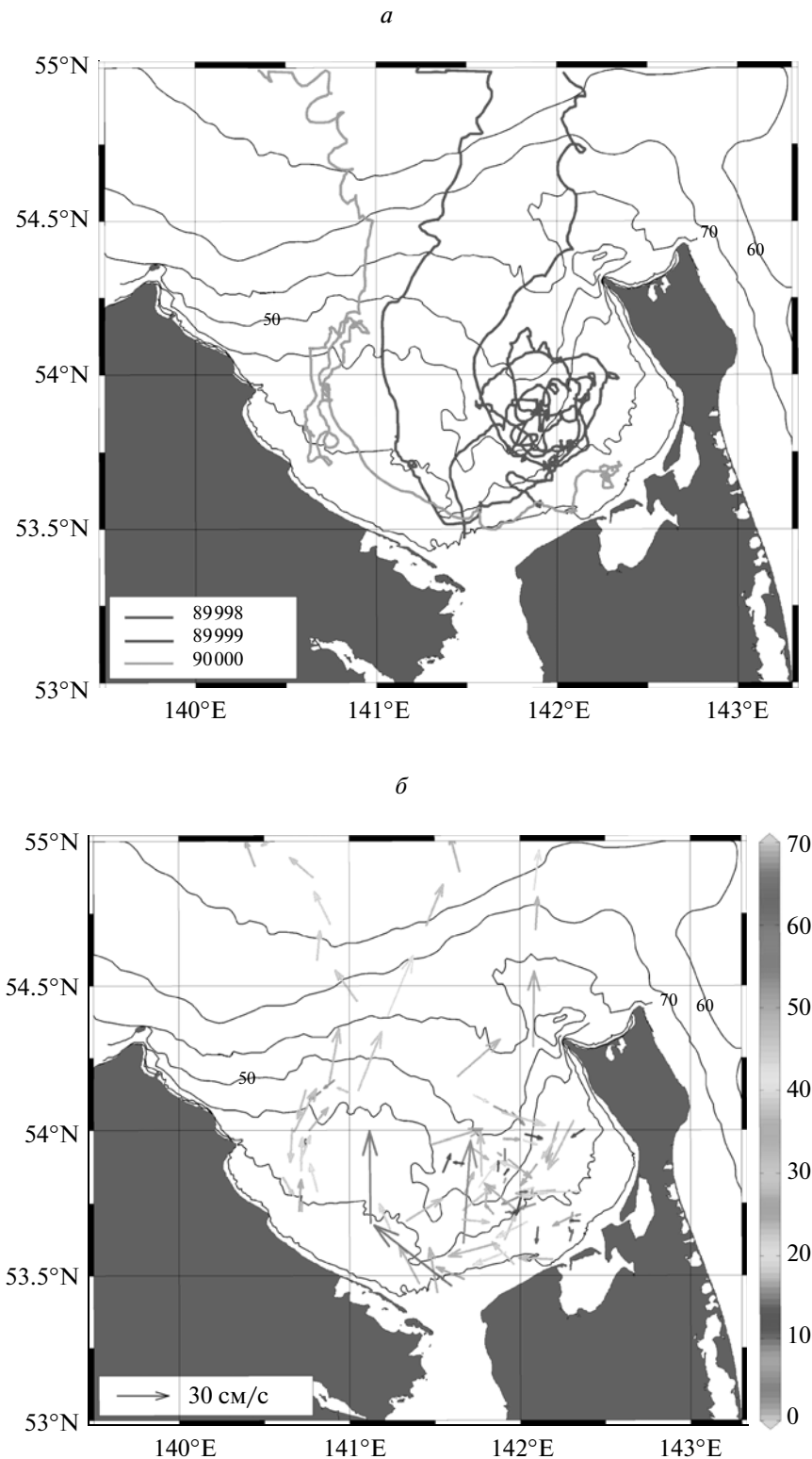
$$V_{fw} = \int_0^{\pi} \int_0^R \int_0^H \frac{\Delta S}{S_0} dr dz d\theta.$$

Здесь  $H$  – максимальная глубина вихря,  $r$  – радиальная координата,  $R$  – максимальный радиус вихря. Аномалия солености определяется как  $\Delta S = S_0 - S$ , где окружающая вихрь соленость  $S_0 = 33$  епс. Полагая постоянную соленость вихря глубиной 7 м  $S = 13$  епс, получим эквивалентный объем пресной воды 17 км<sup>3</sup>. Для глубины 10 м объем пресной воды составит 23 км<sup>3</sup>. Приняв средний сток Амура 0.9 км<sup>3</sup>/день, такой объем будет заполнен за 20 дней для глубины 7 м и 26 дней для глубины 10 м. Если сток составляет максимальную величину  $30 \times 10^3$  м<sup>3</sup>/с (или 2.7 км<sup>3</sup>/день), то заполнение будет за девять дней (для глубины вихря 10 м). Отметим, что время нахождения дрейфера в вихре составило около месяца. Поэтому, благодаря накоплению воды, вихрь удерживает и вмещает в себя значительную часть стока пресной воды Амура.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Основной парадигмой настоящей заметки является демонстрация накопления пресной воды антициклоническим вихрем. Такое накопление пресной воды является результатом сильной сезонной изменчивости расхода Восточно-сахалинского течения (ВСТ). Для того чтобы показать величину сезонного хода расхода ВСТ, мы рассмотрели экмановский перенос в Охотском море. ВСТ усиливается зимой с типичной скоростью около 40 см/с в декабре и почти исчезает летом. При этом южный поток воды, переносимой ВСТ, состоит из двух ядер – прибрежной струи и склонового потока на восточной границе шельфа. Накопление пресной воды в Сахалинском заливе приводит к изменению солености в южном потоке переносимых вод ВСТ. Поскольку межгодовая изменчивость ВСТ очень велика, это приводит к сильной межгодовой изменчивости солености в южной части Охотского моря (Рогачёв, Шлык, 2009). Понимание причин изменения солености важно в связи с изменением климата океана в регионе (Rogachev et al., 2007).

Наблюдения показывают, что стратификация в заливе определяется речным стоком и 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 цир-



**Рис. 3.** *a* – Траектория дрейфтеров Argos в Сахалинском заливе в мае-июне 2009 г.; *б* – вектора среднесуточной скорости течения по данным дрейфтеров. Изобаты через 10 м.

куляция работает длительное время и поддерживается значительной разностью уровня между разными частями эстуария. Эстуарная или грави-

тационная циркуляция – это устойчивая средняя циркуляция, она 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 компоненту (по оси залива), и поперечную. Продольная циркуляция важна для переноса взвеси, льда, планктона и соленой воды. Структура течений в области сильного влияния стока пресной воды является трехмерной (Fujiwara et al., 1997; Kasai et al., 2000). Поэтому поперечная структура течений важна так же, как и продольная циркуляция. 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 – баротропного и бароклинного. Картина течений сильно зависит от числа Экмана  $E$ . Число Экмана, которое определяется в виде

$$E = \frac{A_z}{fH_0^2},$$

где  $H_0$  – максимальная глубина,  $f$  – параметр Кориолиса,  $A_z$  – коэффициент вертикальной вязкости. Поскольку число Экмана сильно зависит от глубины, оно мало для больших значений  $H_0$ . Выполняется следующее соотношение для числа Экмана и глубины слоя Экмана  $d = \sqrt{2EH_0}$ , а глубина Экмана  $d$  определена в виде  $d = \sqrt{2A_z/f}$ .

Для малых значений числа Экмана ( $E < 0.01$ ) геострофический поток становится доминирующим. Поэтому поток в нижнем слое направлен вправо, а в верхнем слое – влево, если смотреть вверх на эстуарий. Для больших значений  $E$  поперечный поток в нижнем слое направлен влево, если смотреть вверх на эстуарий, а в верхнем слое – вправо. В результате поток в верхнем слое формирует антициклоническую циркуляцию.

С целью определения природы циркуляции мы рассмотрели аналитическую модель эстуария (Rogachev et al., 2008) и адаптировали ее для залива. Модель использует правостороннюю систему координат ( $x, y, z$ ). Для создания циркуляции заданы 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 ( $\partial\rho/\partial z < 0$ ). 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 ( $\partial\rho/\partial y > 0$ ).

Результаты расчета течений получены для разных значений числа Экмана. Для  $d = H/2$ ,  $H = 20$  м,

значения параметра Кориолиса  $10^{-4} \text{ с}^{-1}$ , число Экмана  $E = 0.125$ , и  $A_z = 5 \times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ . 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  $A_z = 8 \times 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ . Значение горизонтального градиента плотности  $\frac{\partial\rho}{\partial x}$  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. Следовательно, антициклоническая циркуляция в верхнем слое, хорошо выраженная на спутниковых изображениях, является результатом гравитационной циркуляции в заливе. Накопление пресной воды антициклоническим вихрем в Сахалинском заливе является результатом сезонной изменчивости расхода ВСТ, вызванной сезонным ходом поля ветра в Охотском море.

Авторы признательны Е.Н. Морозову (Экологическая компания Сахалина) за любезно предоставленные данные наблюдений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Жабин И.А., Дубина В.А., Некрасов Д.А., Дударев О.В. Особенности структуры зоны смешения речных и морских вод вблизи реки Амур по данным спутниковых и гидрологических измерений // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 5. С. 61–70.
- Рогачёв К.А., Шлык Н.В. Изменение характеристик халоклина и рост температуры в Камчатском течении и Ойясио // Океанология. 2009. Т. 49. № 6. С 814–819.
- Horner-Devine A.R. The bulge circulation in the Columbia River plume // Continental Shelf Res. 2009. V. 29. P. 234–251.
- 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. V. 12. P. 83–99.
- 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. V. 105. № C7. P. 16961–16969.
- Rogachev K.A., Carmack E.C., Foreman M.G.G. Bowhead whales feed on plankton concentrated by estuarine and tidal currents in Academy Bay, Sea of Okhotsk // Continental Shelf Res. 2008. V. 28. P. 1811–1826.
- 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. V. 56. № 4. P. 439–447.
- 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. V. 54. № 23–26. P. 2643–2656.

## **Anticyclonic Circulation in the Sakhalin Bay, Sea of Okhotsk Determined from Satellite Data**

**K. A. Rogachev, N. V. Shlyk**

*Pacific Oceanological Institute, Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok*

Water circulation in the Sakhalin Bay was investigated on the basis of joint analysis of satellite and oceanographic observations. The data of visible channel of AVHRR and MODIS radiometers (NOAA, Aqua and Terra satellites), with a resolution of 250 m were used. Automated processing of satellite data was done using software developed at the Center for collective use of regional satellite monitoring of the environment FEB RAS. These observations have allowed to establish the anticyclonic circulation in the upper bay and to determine the velocity of flow at the surface. Satellite data, together with observations of the drifting buoys Argos revealed anticyclonic circulation in the Gulf at the surface. Based on these observations, it is concluded that the circulation is estuarine.

**Keywords:** Sakhalin Bay, Sea of Okhotsk