

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ АНТИЦИКЛОНИЧЕСКОГО ВИХРЯ  
В САХАЛИНСКОМ ЗАЛИВЕ ПО СПУТНИКОВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

© 2013 г. К. А. Рогачев\*, Н. В. Шлык

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

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

Поступила в редакцию 14.01.2013 г.

Данные радиометра AVHRR с пространственным разрешением 1.1 км (спутники серии NOAA), а также радиометра MODIS с разрешением 250 м (спутники Aqua и Terra) использованы для определения характеристик антициклонического вихря в Сахалинском заливе. Спутниковые наблюдения указывают на регулярное формирование антициклонического вихря в Сахалинском заливе в теплое время года. Вместе с тем механизм формирования такого вихря до сих пор не был определен. В настоящей работе рассмотрен новый механизм формирования антициклонического вихря в заливе. Наша гипотеза предполагает, что особенность батиметрии залива создает асимметрию в динамике вод. Простая аналитическая модель прибрежных течений на шельфе, учитывающая реальную батиметрию, позволяет определить реакцию прибрежных вод на воздействие ветра. Батиметрия залива включает ложбину с глубиной до 50 м в его восточной части и широкий шельф с глубинами около 20 м у западного берега. Поперечная компонента скорости при южном ветре в этой ложбине направлена в залив и в противоположную сторону в его мелкой части. Тем самым показано, что антициклонический вихрь формируется под действием южного ветра, характерного для региона в теплое время года.

**Ключевые слова:** эстуарная циркуляция, антициклонические вихри на шельфе Охотского моря, Сахалинский залив, Охотское море

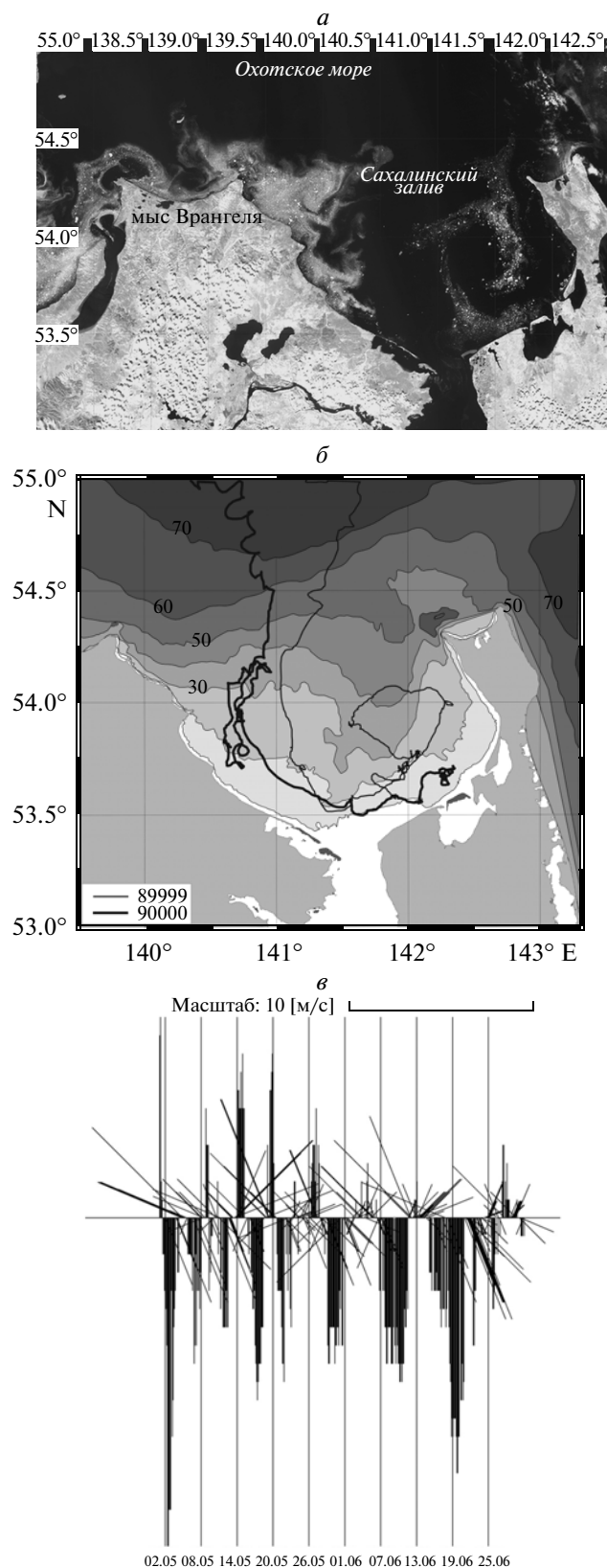
DOI: 10.7868/S0205961413050059

ВВЕДЕНИЕ

Сахалинский залив, расположенный в северо-западной части Охотского моря, ограничен материком на западе и о. Сахалин на востоке. Глубина моря в заливе растет с юга на север и меняется от нескольких метров в Амурском лимане до 100 м на его северной границе. Важной чертой батиметрии залива является ложбина с глубиной до 50 м в его восточной части и широкий шельф с глубиной около 20 м в западной (рис. 1а). Эта ложбина создает асимметрию, которая, как показано в настоящей работе, является существенной для динамики вод. Гидрологические условия самого залива и Амурского лимана находятся под влиянием сильных приливных течений, однако их характеристики до сих пор слабо изучены. Кроме того, сезонная изменчивость прибрежных течений и термохалинных характеристик в Охотском море очень велика из-за смены муссона в мае-июне. Например, Восточно-сахалинское течение усилено зимой и почти исчезает летом (Ebuchi, 2006). Сильная сезонная изменчивость прибрежного потока Восточно-сахалинского течения была показана также Mizuta et al. (2003). Скорость

южного потока этого течения на глубине 200 м достигает максимума около 40 см/с в январе и минимума около 10 см/с в июле. При этом перенос массы превышает 12 Свердрупов в феврале и падает в 10 раз в октябре. Поток массы Восточно-сахалинского течения зимой определяется экмановским переносом к берегу из-за преобладающего северо-западного ветра зимой (Simizu, Ohshima, 2002). Летом (май–июнь) ветер меняет направление на южное (рис. 1б). Благодаря сезонной смене ветра, аномалия уровня Охотского моря у побережья Сахалина растет зимой и падает летом. Сезонные колебания уровня, связанные со сменой ветра, отмечены также в работах Романова и др. (2004) и Шевченко и др. (2007).

Сезонный ход стока р. Амур в Сахалинский залив также вносит значительный вклад в изменчивость солености залива. Вода низкой солености, стекающая в Сахалинский залив, формирует антициклонический вихрь (рис. 2). Эффективное время нахождения воды в вихре может составлять несколько дней, что связано с изменением циркуляции окружающих вод. Как следствие, это приводит к ослаблению речного потока прибреж-



**Рис. 1.** Район исследований: *a* – изображение MODIS Aqua за 15.06.2003 г в видимом диапазоне (хорошо видна антициклоническая спираль таящего льда в Сахалинском заливе); *б* – батиметрия залива и траектория дрейфтеров Argos в антициклоническом вихре в мае–июне 2009 г.; *в* – ветер (м/с) на метеостанции Погиби в мае–июне 2009 г. (данные сайта [www.rp5.ru](http://www.rp5.ru)).

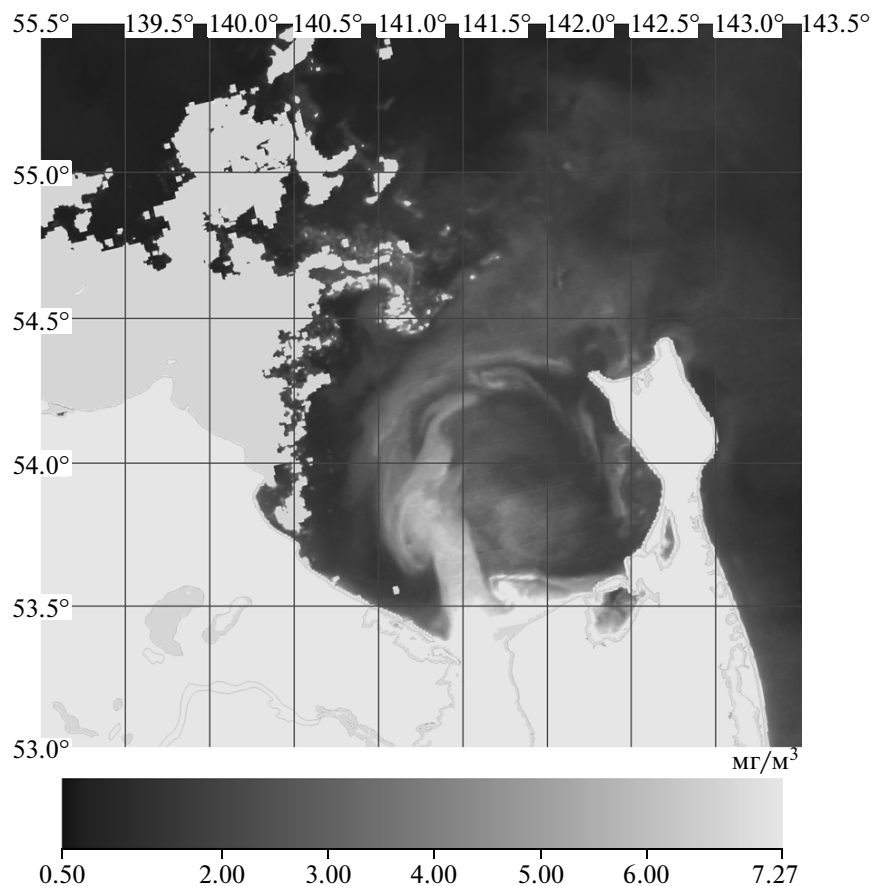
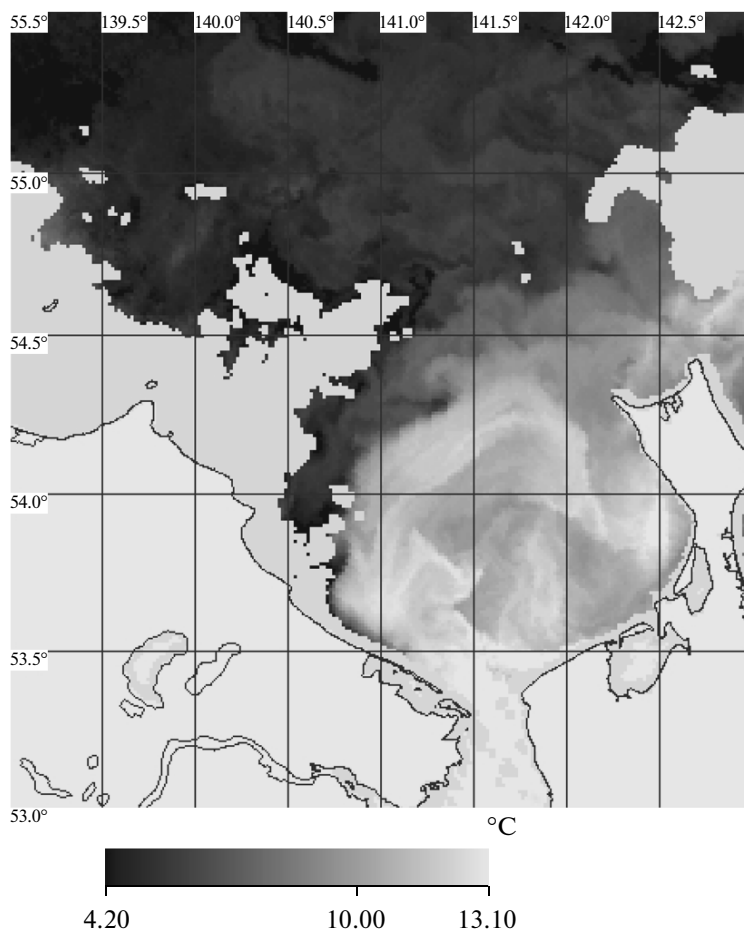


Рис. 2. Концентрация Chla по данным спутника Aqua от 15.06.2009 г.

ным течением. Кроме того, от этого зависит вынос загрязняющих, взвешенных и растворимых веществ в Охотское море. Вихрь содержит воду с относительно высокой температурой и низкой соленостью и плотностью (Рогачев, Шлык, 2011). Спутниковые изображения дают представление о размерах такого вихря, однако они не раскрывают его внутреннюю структуру и скорость потока. Особенно, если эта скорость потока меняется с глубиной, поскольку это имеет место в случае гравитационной циркуляции. Механизм формирования такого вихря до сих пор оставался неясным. Спутниковые наблюдения в других районах показывают, что поток вод на шельф прямо связан с присутствием вихрей на континентальном склоне. Известно, что антициклонические вихри существенно меняют циркуляцию и термохалинную структуру вод (Okkonen, 1996; Rogachev et al., 2007; Rogachev et al., 2008; Рогачев, Шлык, 2009; Рогачев, Шлык, 2011).

Течения на шельфе Охотского моря определяются различными силами, включающими ветер, приливы, градиент давления, инерционные вол-

ны. Ветер является доминирующим источником энергии для течений в прибрежной зоне Охотского моря. Залив и его сложная батиметрия под действием ветра создает горизонтальный градиент давления и трение. Поэтому течения зависят от наклона уровня. Прибрежная циркуляция контролирует обмен залива с глубоким морем. В заливе со сложной батиметрией (например, глубокий канал по оси залива и мелководье на его границах) местный ветер генерирует поток по ветру на мелководье и противоположный поток в канале (Wong, 1994; Winant, 2004; Narvaez, Valle-Levinson, 2008). В случае сильного перемешивания оба потока достигают либо дна, либо поверхности. Различие в направлении потока связано с балансом между напряжением ветра и градиентом давления, который становится важным в глубоком канале. В настоящей работе на основе спутниковых наблюдений мы раскрываем механизм формирования антициклонического вихря в Сахалинском заливе.



**Рис. 3.** Поле поверхностной температуры по данным спутника NOAA от 01.06.2012 г. (темный цвет соответствует холодной воде).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Спутниковые наблюдения включают изображения радиометра AVHRR и данные канала 1 радиометра MODIS (пространственное разрешение 250 м), предоставленные Центром коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН ([www.satellite.dvo.ru](http://www.satellite.dvo.ru)).

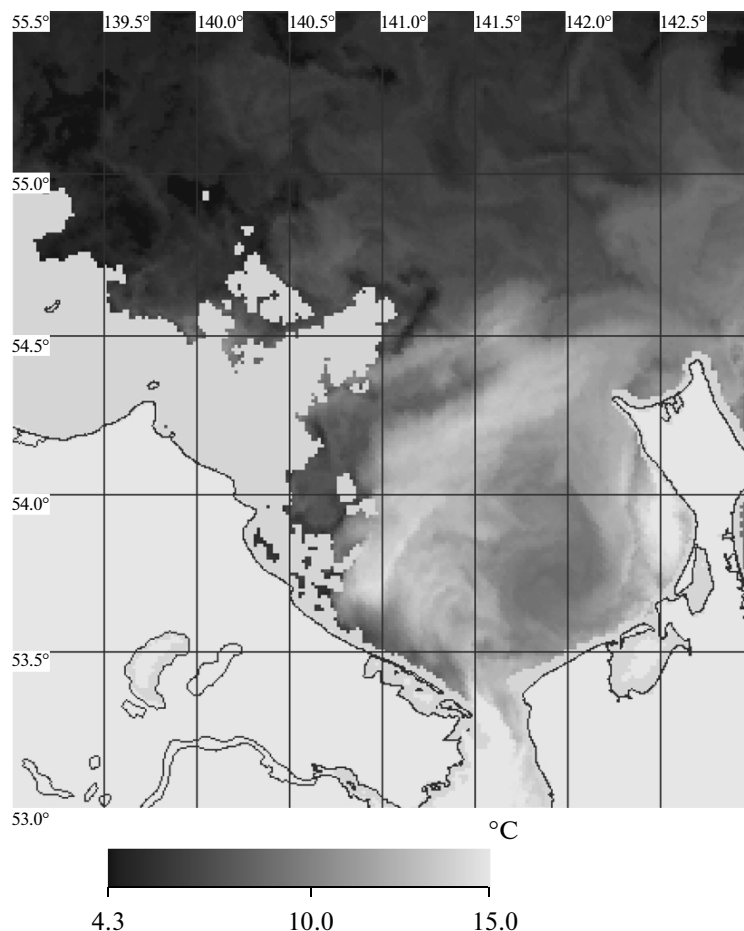
Для определения циркуляции вод использовались траектории дрейфтеров Argos, выставленных в заливе в апреле 2009 г. на припайный лед сотрудниками Экологической компании Сахалина, и предоставленные Е.Н. Морозовым. Для построения траектории дрейфтеров мы располагали их ежечасным положением. Анализ этих данных сделан нами ранее (Рогачев, Шлык, 2011). Три дрейфтера Argos, установленные на припайный лед в Сахалинском заливе в апреле 2009 г., были вовлечены в антициклоническую циркуляцию диаметром около 50 км (рис. 1б). Внутренний дрейфтер находился в пределах вихря в течение одного месяца.

Среднесуточная скорость дрейфтера 89998 достигла 70 см/с 1 июня 2009 г., а двух других буев — около 60 см/с. Все три буй покинули антициклонический вихрь во время усиления южного ветра.

Гидрологические данные включают наблюдения, сделанные ТОИ в разные годы. Батиметрия, использованная для расчета скорости потока, взята из российских навигационных карт.

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Спутниковые данные указывают на регулярное формирование вихря в Сахалинском заливе. Диаметр антициклонического вихря составил около 50 км, что меньше, чем диаметр вихрей у Курильских о-вов (рис. 3–5). В заливе наблюдается относительно высокая стратификация, вызванная потоком теплой воды низкой солености на поверхности и холодной соленой водой из глубокой части моря (рис. 6). Толщина слоя низкой солености составляет несколько метров (рис. 6а–в). Струя теплых и мутных вод хорошо выделяется на спутни-



**Рис. 4.** Поле поверхностной температуры по данным спутника NOAA от 02.06.2012 г. (темный цвет соответствует холодной воде).

ковых изображениях (рис. 5б). Вынос амурской воды хорошо виден у южной границе спирали из тающего льда (рис. 5). На изображении видимого канала спутника Aqua, видна узкая полоса тающего льда шириной 5–10 км, которая формирует антициклонический вихрь в заливе непосредственно до стока мутной воды Амура. Это означает, что формирование вихря не связано со стоком пресной воды.

## ОБСУЖДЕНИЕ

### *Формирование антициклонического вихря в заливе под действием южного ветра*

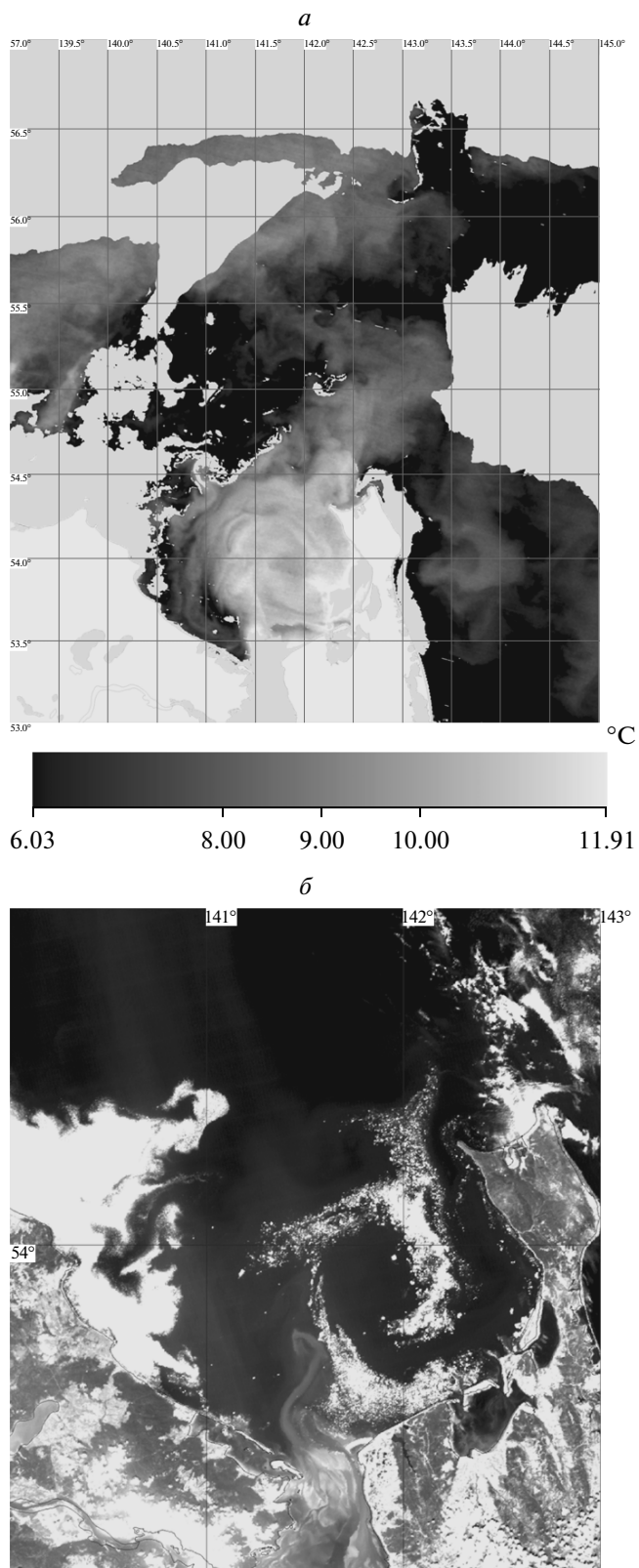
Эстуарная, или гравитационная, циркуляция — это устойчивая средняя циркуляция, и она представляет собой концепцию идеальной циркуляции. В реальности южный ветер создает дрейфовое течение и сгон воды, что приводит к формированию наклона уровня и тем самым создает поток воды в промежуточном слое. Чтобы объяснить формирование антициклонического вихря в пери-

од действия южного ветра в заливе, мы рассмотрели простую аналитическую модель циркуляции вод и адаптировали ее для реальной батиметрии. Следуя работам Winant (2004) и Narvaez, Valle-Levinson (2008), баланс момента импульса в направлении вдоль залива будем полагать между градиентом давления и трением, что в безразмерном виде можно записать

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad (1)$$

где  $u$ ,  $\eta$ ,  $x$ ,  $z$  — безразмерная скорость потока вдоль эстуария, аномалия уровня, координата вдоль эстуария и вертикальная координата соответственно. Размерные масштабы этих переменных заданы в виде

$$u = \frac{\rho A_z}{\tau H} u_d, \quad \eta = \frac{\rho g H}{\tau L} \eta_d, \quad x = \frac{x_d}{L}, \quad z = \frac{z_d}{H}. \quad (2)$$



**Рис. 5.** *a* – Поле поверхностной температуры по данным MODIS Terra от 15.06.2009 г. (темный цвет соответствует холодной воде); *b* – изображение MODIS Aqua (видимый диапазон) (мутная вода р. Амур распространяется в западной части Сахалинского залива).

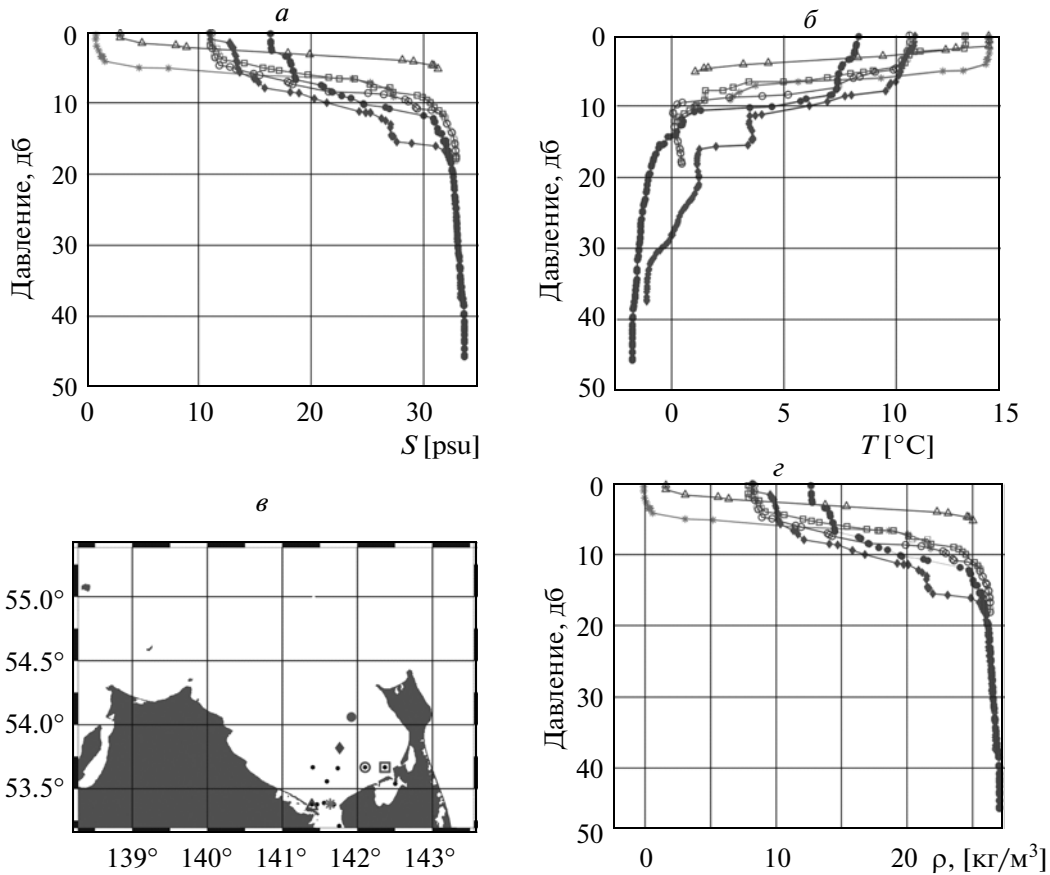


Рис. 6. Вертикальные профили солёности, температуры и условной плотности в заливе.

В уравнении (2)  $\rho$  – плотность морской воды ( $\text{кг/м}^3$ );  $\tau$  – напряжение ветра (Па);  $A_z$  – коэффициент вертикальной вязкости ( $\text{м}^2/\text{с}$ );  $H$  – глубина моря (м);  $g$  – ускорение силы тяжести ( $\text{м/с}^2$ );  $L$  – продольный размер эстуария (м), индекс  $d$  означает размерную переменную. Преимущество использования безразмерных переменных в том, что решение не зависит от  $\rho$ ,  $\tau$ ,  $A_z$ ,  $H$ ,  $L$ ,  $g$ .

Граничными условиями для решения уравнения (1) являются прилипание на дне и заданное напряжение ветра на поверхности

$$u = 0, \quad z = -h, \quad \frac{\partial u}{\partial z} = 1, \quad z = 0, \quad (3)$$

где  $h$  – безразмерная глубина. Интегрируя уравнение (1) дважды и подставляя граничные условия (3), получим распределение скорости, которое сильно зависит от глубины места и градиента аномалии уровня

$$u = \frac{\partial \eta}{\partial x} \left( \frac{z^2 - h^2}{2} \right) + (z + h). \quad (4)$$

Это решение описывает поток, вызываемый ветром на поперечном разрезе, для реального распределения глубины. Первый член правой части уравнения (4) отражает поток, вызываемый наклоном уровня. Он представляет собой параболический профиль скорости потока, направленный против наклона уровня. Второй член правой части представляет собой поток, вызванный ветром, и направленный по ветру. Он ослабевает линейно с глубиной. Величину наклона уровня можно определить, интегрируя уравнение (4), чтобы получить полный поток на разрезе. Полагая отсутствие полного потока на поперечном разрезе с реальной батиметрией  $h(y)$ , можно получить соотношение для наклона уровня. Тем самым можно использовать уравнение (4) для расчета распределения скорости на поперечном разрезе через залив. Результаты расчета скорости потока для реального профиля глубины через залив показывают, что продольная компонента скорости направлена в залив в глубоком канале и в противоположную сторону в самом верхнем слое (рис. 7). Благодаря такому асимметричному распределению скорости формируется антициклонический вихрь. Тем самым поток в залив при южном ветре связан с форми-

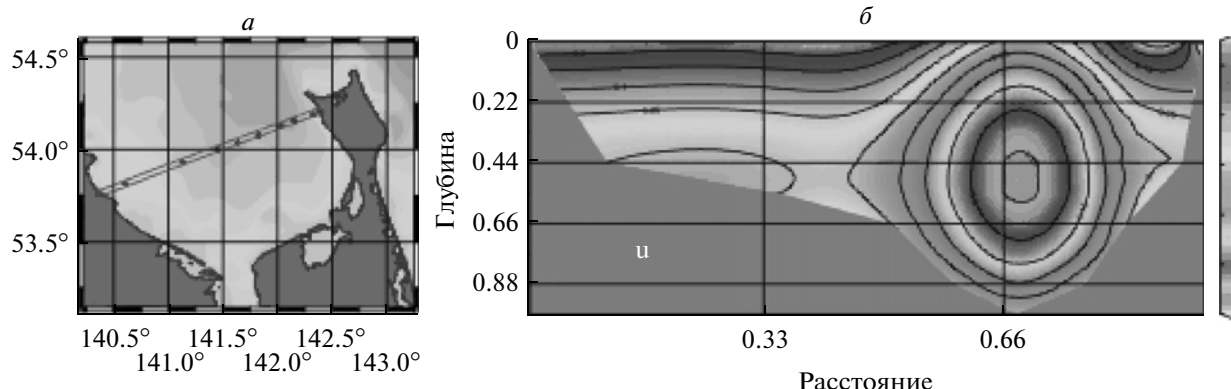


Рис. 7. Поперечная компонента скорости на разрезе через залив, полученная с использованием аналитической модели во время действия южного ветра. Все переменные безразмерные. Поток в глубокой части направлен в залив.

рованием наклона уровня и его определяющей роли для течения в промежуточном слое.

## ВЫВОДЫ

Ложбина в восточной части залива и широкий шельф в его западной половине являются важными особенностями батиметрии для динамики вод. Эта ложбина создает асимметрию в распределении потока вод. Рассмотренная модель динамики вод показала, что поток в ложбине залива на его восточной стороне вызван действием отжимного (сгонного) ветра. Апвеллинг и адвекция холодной воды происходят в глубокой части у восточного берега залива под действием южного ветра. Механизм циркуляции вод в заливе связан с формированием наклона уровня под действием ветра. Наклон уровня вызывает поток на шельф и подъем вод. На мелководье в западной половине залива поток направлен по ветру на север, что убедительно отражено спутниковыми наблюдениями. Смена ветра на южный в теплый период года является существенной для формирования антициклонического вихря.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Рогачев К.А., Шлык Н.В. Антициклоническая циркуляция вод Амура в Сахалинском заливе по спутниковым и морским наблюдениям // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 6. С. 73–79.

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.

Романов А.А., Шевченко Г.В., Седаева О.С. Сезонные колебания уровня Охотского моря по данным береговых мареографных станций и спутниковой альтиметрии // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 6. С. 59–72.

Шевченко Г.В., Седаева О.С., Романов А.А., Вилянская Е.А. Сезонные колебания уровня Охотского моря в Татарском проливе по данным спутниковой альтиметрии // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 59–72.

Ebuchi N. Seasonal and interannual variations of the East Sakhalin Current observed by the TOPEX/POSEIDON altimeter // J. Oceanogr. 2006. V. 62. P. 171–183.

Mizuta G., Ohshima K.I., Fukamachi Y., Wakatsuchi M. Structure and seasonal variability of the East Sakhalin Current // J. Phys. Oceanogr. 2003. V. 33. № 11. P. 2430–2445.

Шевченко Г.В., Седаева О.С., Романов А.А., Вилянская Е.А. Сезонные колебания уровня Охотского моря в Татарском проливе по данным спутниковой альтиметрии // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 59–72.

Narvaez D.A., Valle-Levinson A. Transverse structure of wind-driven flow at the entrance to an estuary: Nansmond River // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № C09004. doi: 10.1029/2008JC004770.2008.

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., Carmack E.C., Foreman M.G.G. Bowhead whales feed on plankton concentrated by estuarine and tidal currents in Academy Bay, Sea of Okhotsk // Cont. Shelf Res. 2008. V. 28. P. 1811–1826.

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 Stud. Oceanogr. 2007. V. 54. № 23–26. P. 2643–2656.

Simizu D., Ohshima K.I. Barotropic response of the Sea of Okhotsk to wind forcing // J. Oceanogr. 2002. V. 58. P. 851–860.

Winant C.D. Three dimensional wind-driven flow in an elongated rotating basin // J. Phys. Oceanogr. 2004. V. 34. P. 462–476.

Wong K.-C. On the nature of transverse variability in a coastal plain estuary // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. № C7. P. 14209–14222.



## Wind-Driven Anticyclonic Circulation in Sakhalin Bay, Sea of Okhotsk

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

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

Winds and buoyancy drive the circulation in small bays and estuaries. That circulation controls the exchange with the adjacent waters in deep sea. In bays with complex bathymetry local wind produces downwind flows over shoal and upwind flow in deep channel. Observations with adequate spatial resolution are rarely obtained to resolve the lateral structure of wind-induced exchange flows. The main purpose of this study is to investigate the wind-driven structure of the flow in the Sakhalin Bay, Sea of Okhotsk. The upwelling, observed in the bay, is driven by the meridional pressure gradient generated by the set down of sea level. The analytical solution of wind-driven flow is applied to the cross-section. The wind-driven circulation consisted of downward flow in the surface layer and upwind flow in the deep channel.

**Keywords:** wind-driven, anticyclonic circulation, Sakhalin Bay, Sea of Okhotsk