

# Субмезомасштабные струи на континентальном шельфе залива Петра Великого (Японского моря)

К.А. Рогачев

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

Для определения доминирующих физических процессов, влияющих на циркуляцию вод Уссурийского залива и прилегающих районов залива Петра Великого, 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 (Aqua и Terra). Установлено, что вода, заполняющая Уссурийский залив в теплый период происходит из верхнего слоя мезомасштабных вихрей, расположенных у континентального склона. Развитие субмезомасштабных струй является основным процессом, меняющим температуру в Уссурийском заливе. Антициклоническая циркуляция существенно понижает относительную завихренность и в самом заливе, и в области мезомасштабного вихря. Циклоны, обнаруженные по спутниковым наблюдениям на границе вихря, являются индикатором погружения вод на континентальном шельфе. Скорость погружения воды составила ~ 160 м/день.

**Ключевые слова:** субмезомасштабные процессы, залив Петра Великого, Японское море.

## Введение

Циркуляция вод в глубокой части Японского моря на основе спутниковых наблюдений и дрейфующих буёв изучалась в работе [1]. Вместе с тем, динамика вод непосредственно на шельфе и континентальном склоне залива Петра Великого до сих пор не исследована. В настоящее время не существует детальных наблюдений, которыми была бы определена циркуляция вод в Уссурийском заливе и его бухтах. Используемые модели для расчёта средней циркуляции в бухтах и заливе не основывались на результатах инструментальных наблюдений, и противоречат им [2]. Цель настоящей работы - установить основные характеристики мезо и субмезомасштабных процессов залива. Под мезомасштабными явлениями обычно понимают вихри диаметром 50-300 км. Субмезомасштабные струи имеют поперечный размер 1-10 км.

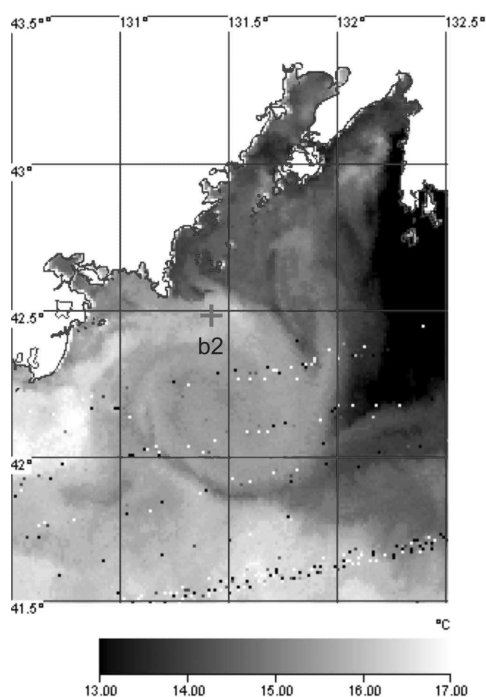
В настоящее время в заливе Петра Великого и Уссурийском заливе культивируется приморский гребешок (*Mizuhopecten yessoensis*). Бухта Суходол Уссурийского залива является также одним из немногих мест воспроизводства анадары Броутона (*Anadara broughtonii*). Анадара Броутона является теплолюбивым видом [3-4]. Процесс, определяющий рост и падение температуры в переходные сезоны, устанавливает благоприятный период для теплолюбивых моллюсков и беспозвоночных. Поэтому, для сохранения популяций моллюсков важно понимать причину быстрого изменения придонной температуры в заливе и его бухтах.

Течения в северной части Уссурийского залива и бухте Суходол в теплое время года определяются потоком вод из глубокой части залива Петра Великого [2]. Этот поток вызван присутствием мезомасштабных вихрей на континентальном склоне залива. Известно, что мезомасштабные вихри существенно меняют циркуляцию и термохалинную структуру вод [1, 5-8]. В настоящей заметке мы показываем, что на границе вихря разви-

ваются субмезомасштабные циклоны. Циклоническая циркуляция является индикатором быстрого погружения вод на континентальном склоне.

### Данные и метод

Спутниковые наблюдения включают изображения видимых каналов радиометра AVHRR с пространственным разрешением 1,1 км (ИСЗ серии NOAA), предоставленные Центром коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН. Полевые работы выполнялись в 2008-2009 гг. Для того чтобы понять физические механизмы, которые определяют динамику вод, мы выполнили измерения течений и термохалинных характеристик. Для измерения течений использовались электромагнитные измерители течений S4. Зондирования выполнялись СТД зондом SBE-19plus, и RBR XR-620. На **рис. 1** указано положение буя с измерителями течений в 2009 г., данные которых рассмотрены в настоящей заметке.



*Рис. 1. Положение буя b2 с измерителями течений в 2009 г. Показано поле поверхностной температуры по данным спутника НОАА-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. К северу от буя b2 формируется циклон*

### Результаты

Динамика вод в заливе в значительной степени находится под воздействием мезомасштабных и субмезомасштабных процессов. По спутниковым данным мезомасштабные антициклонические вихри диаметром около 80 км расположены на континентальном склоне залива Петра Великого. Наши наблюдения, выполненные в сентябре 2009 г., показывают, что ядро таких вихрей (20-100 дбар) содержит тёплую воду (~14-18°C) низкой

солёности и плотности. Спутниковые данные указывают на распространение субмезомасштабных струй по границе вихря и далее в Уссурийский залив (рис. 1).

Скорость течения, измеренная на континентальном склоне, показывает поток вниз по склону со средней скоростью 4 км/день и максимальной скоростью до 18 см/с в нижнем слое (рис. 2). При этом наклон дна в месте постановки буя с инструментами составляет  $4 \cdot 10^{-2}$ . Это позволяет оценить вертикальную скорость погружения воды величиной  $\sim 160$  м день<sup>-1</sup>. Измеренный поток в нижнем слое направлен поперек течения на поверхности, формирующего антициклоническую циркуляцию мезомасштабного вихря (рис. 1). Спутниковые данные указывают на развитие холодного циклонического вторжения на границе вихря к востоку от мыса Гамова. Такие холодные циклонические вторжения диаметром около 10-20 км быстро развиваются на его границе (рис. 3). Вместе с тем, струя теплых вод распространялась в северном направлении и проникала в Уссурийский залив (рис. 1). Временная серия наблюдений за температурой в Уссурийском заливе (буй b1) содержит периоды роста температуры, связанные с развитием тёплых субмезомасштабных струй. Спутниковые наблюдения указывают на проникновение субмезомасштабных струй, поставляющих теплую воду низкой солёности в залив. Тем самым, в результате обмена вод Уссурийского залива с глубоким морем относительно быстро изменяются характеристики вод.

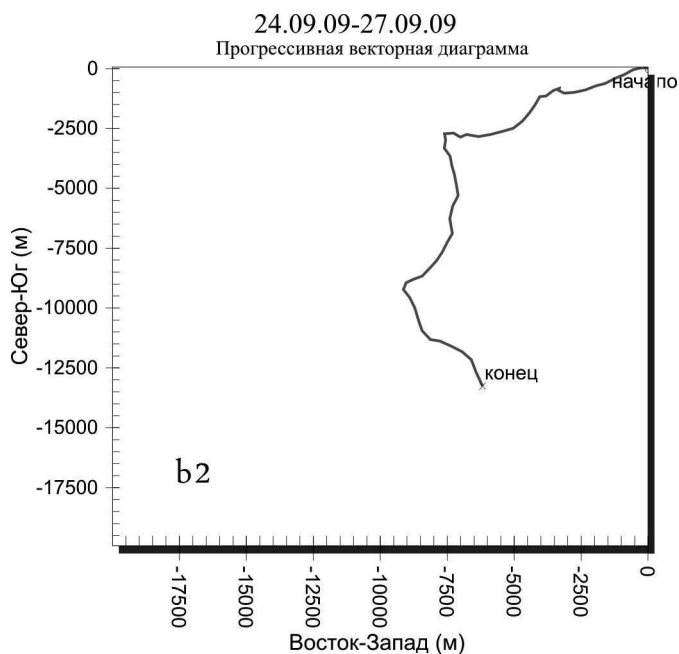


Рис. 2. Прогрессивная векторная диаграмма для буя b2

Так, температура верхнего слоя в сентябре 2008 г. достигала 21°C, благодаря поступлению теплой воды из глубокой части Японского моря. Особенно выразительным стал рост температуры в придонном слое. Температура в сентябре в придонном слое превышала 16°C, при этом, солёность составляла около 33 psu. Солёность была понижена во всём слое от поверхности до дна. Из-за низкой солёности и высокой температуры в этот период наблюдались низкие значения плотности. Её значения в придонном слое составили около 24 кг/м<sup>3</sup>, и 22-23 кг/м<sup>3</sup> в верхнем слое. Характеристики температуры и солёности, определённые 12 сентября на том же поперечном разрезе, соответствуют верхнему слою мезомасштабного вихря глубокой части моря, расположенного на континентальном склоне залива Петра Великого (рис. 1). Спутниковые наблюдения показывают, что субмезо-

масштабные струи тёплых вод проникали в Уссурийский залив в этот период. Понижение температуры придонного слоя, увеличение солёности и плотности произошло в результате смены ветра. Экмановский перенос в результате действия сильного северо-западного ветра привёл к замене воды в заливе на холодную и солёную воду Приморского течения.

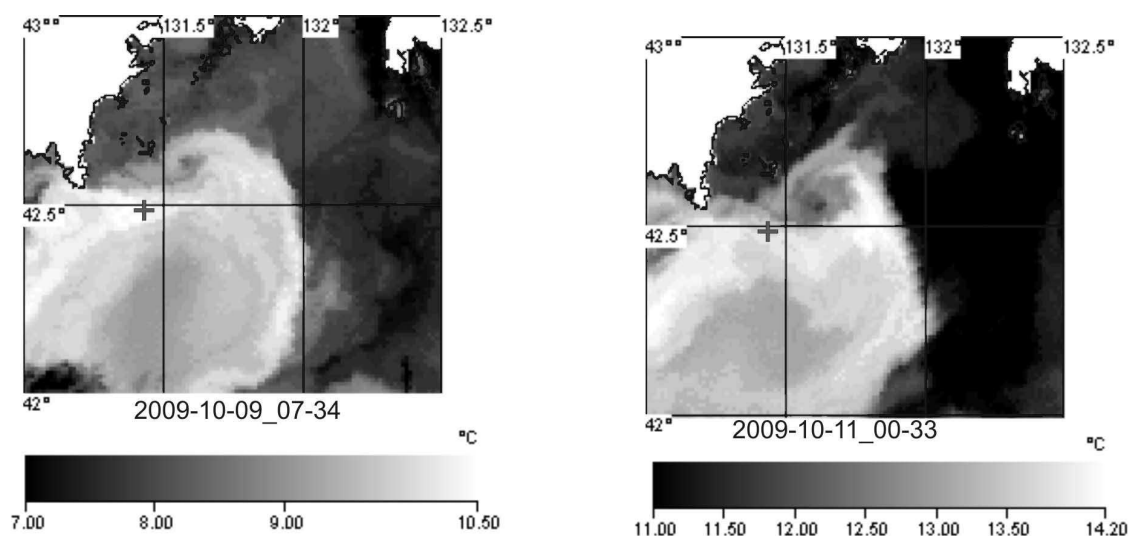


Рис. 3. Эволюция циклонической завихренности на границе антициклонического вихря

### Обсуждение и выводы

Прогрессивная векторная диаграмма для буя b2, установленного на границе вихря, указывает на поток к югу в нижнем слое (рис. 1). Поскольку этот поток направлен поперек изобат вниз по склону, погружение воды в этом слое с вертикальной скоростью  $w$  составляет  $w = 4 \text{ км/день} \cdot (\frac{\partial H}{\partial y} = 0.04) = 160 \text{ м/день}$ . Погружение этого слоя означает развитие зоны конвергенции на склоне и формирование циклонической завихренности, хорошо выраженной по спутниковым данным. Поэтому, циклоническая циркуляция, обнаруженная по спутниковым данным (рис. 1, 3), отражает развитие процесса погружения воды. Скорость изменения относительной завихренности объёма воды определяется вертикальной скоростью:

$$\frac{D}{Dt} \left( f + \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \left( f + \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \frac{\partial w}{\partial z}, \quad (1)$$

где  $u, v$  – компоненты скорости вдоль и поперек фронта, а  $w$  – вертикальная скорость.  $f$  – постоянный параметр Кориолиса ( $f = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ). В зоне конвергенции правая часть (1) положительная ( $\frac{\partial w}{\partial z} > 0$ ). Кроме того, рост циклонической завихренности усиливается для цикла, поскольку правая часть соотношения (1) возрастает. В зоне дивергенции, наоборот, усиление отрицательной (антициклонической) завихренности замедляет изменение завихренности, поскольку величина в круглых скобках правой части уменьшается. Это создает сильную асимметрию между циклонической и антициклонической завихренности. Поэтому циклоническая завихренность развивается быстрее антициклонической.

Субмезомасштабные струи имеют поперечный размер от 1 до 10 км. Такие струи формируются на границе мезомасштабных вихрей и поставляют воду из ядра вихрей в Уссурийский залив (**рис. 1**). Наиболее вероятный механизм, обеспечивающий развитие струй связан с развитием поперечной циркуляции во фронтальной зоне [9]. Формирование субмезомасштабной струи в результате поперечной циркуляции в настоящее время является гипотезой. Для определения точного механизма образования струй в заливе нужны детальные прямые измерения течений.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 09-05-98521.*

### Литература

1. Гинзбург А.И., А.Г. Костяной, А.Г. Островский. Поверхностная циркуляция Японского моря (спутниковая информация и данные дрейфующих буёв) // Исследование Земли из Космоса. 1998. №1. С. 66-83.
2. Рогачёв К.А., Горячев В.А. Подветренная антициклоническая циркуляция в бухте Суходол (залив Петра Великого, Японское море) // Известия ТИНРО. 2008. Т. 154. С. 125-134.
3. 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) // Бюллетень Дальневосточного Малакологического общества. 2004. Вып. 8. С. 43-60.
4. Калинина М.В. 2008. Сроки наступления половозрелости и половая структура скоплений анадары Броутона в заливе Петра Великого // Изв. Тинро. Т. 55. С. 144-151.
5. Рогачёв К. А. Кислородное пересыщение и оценки первичной продукции на границах теплого вихря Куроисио // Океанология. 1989. Т. 29, № 6. С. 960.
6. Рогачёв К. А. Развитие мезомасштабных струй во фронтальной зоне Куроисио-Ойясио // Исследование Земли из Космоса. 1993. № 4. С. 25-32.
7. 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.
8. 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 Research II. 2007. Vol.54/23-26. pp. 2643-2656.
9. Wang D.-P. Model of frontogenesis: Subduction and upwelling // Journal of Marine Research. 1993. Vol. 51. P. 497-513.

## Submesoscale streamers on the continental shelf of the Peter The Great Bay

**Konstantin Rogachev**

*Pacific Oceanological Institute  
690041 Vladivostok, 43 Baltiyskay Road  
E-mails: rogachev@poi.dvo.ru*

Circulation of the Ussuri and Peter The Great Bays, Sea of Japan, was studied using direct observations. It is shown, that the water filled the Ussuri Bay originated from the mesoscale eddy at the continental shelf. Submesoscale streamers are the major source for water of the Bay. Significant warming is established due to penetration of these warm submesoscale streamers. It is shown, that cyclonic circulation develops at the front of the mesoscale eddy. This cyclones associated with downwelling at the shelf break.

**Keywords:** coastal ecosystem, Ussuri Bay, submesoscale cyclones