УДК 551.468

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАСКАДИНГА НА КОНТИНЕНТАЛЬНОМ СКЛОНЕ В ЗАЛИВЕ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

В.Б. Лобанов, А.Ф. Сергеев, И.И. Горин, П.Е. Щербинин, П.Ю. Семкин

Процесс стекания по континентальному склону вод повышенной плотности, формирующихся на шельфе в зимний период, известен как склоновая конвекция, или каскадинг. В Японском море он отмечается в заливе Петра Великого и, по-видимому, является одним из основных механизмов вентиляции глубинных и донных слоев моря. В настоящей работе представлены результаты прямых наблюдений с помощью автономных донных станций (АДС) и судовых СТД-съемок на кромке шельфа и склоне залива Петра Великого в зимние периоды 2010–2014 гг. Впервые анализируется регулярность каскадинга, его локализация, глубина проникновения и межгодовая изменчивость. Подход холодных шельфовых вод к кромке, формирующих каскадинг, отмечался каждый год, преимущественно в феврале-марте, хотя отдельные эпизоды зарегистрированы в апреле и даже в начале мая. Несмотря на это только один эпизод каскадинга был зарегистрирован по данным АДС на склоне глубже 1 км. В то же время значительное количество интрузионных слоев, наблюдающихся по данным СТД-измерений в области континентального склона, указывают на проникновение каскадинга вплоть до его подножья (2800–3000 м).

Ключевые слова: склоновая конвекция, каскадинг, залив Петра Великого, континентальный склон, шельф, автономная донная станция.

Введение

Склоновая конвекция, или каскадинг – процесс гравитационного стекания более плотных вод по континентальному склону – является одним из важнейших механизмов вентиляции глубинных слоев морей и океанов. Он наблюдается в различных районах Мирового океана [1]. Предполагается, что в северо-западной части Японского моря каскадинг на склоне залива Петра Великого является одним из основных механизмов обновления глубинных и донных слоев моря [2-6]. Процесс каскадинга связан с фомированием вод повышенной плотности на шельфе залива зимой в результате термохалинной конвекции, обусловленной охлаждением, испарением и выделением солевого рассола при льдообразовании и их последующим скатыванием вниз по континентальному склону. С этим связаны внезапные интенсивные потоки вод и перенос взвешенного вещества. Изучение каскадинга важно для исследования механизмов вентиляции глубинных слоев Японского моря, оценки его реакции на глобальные климатические

изменения, а также локальных биогеохимических, седиментационных и геохимических процессов на склоне залива и прилегающей части глубоководной котловины.

Вероятно, первые доказательства каскадинга на склоне залива Петра Великого были представлены в работе [7], где по результатам СТД-зондирований был показан язык плотных вод, стекающих с шельфа по склону залива до глубины около 200 м. Значительно более глубокое проникновение каскадинга, до подножья склона (2800-2900 м), было зарегистрирован нами впервые в апреле 1999 г. По данным СТД-зондирований на нескольких станциях был обнаружен придонный слой вод с аномальными характеристиками [8]. Но это было всего несколько станций. В гораздо более масштабных объемах результат каскадинга наблюдался в феврале-марте 2001 г. [9, 10, 11] как последствие суровой зимы, мощного льдообразования и охлаждения вод залива. За счет интенсивных конвективных процессов произошли вентиляция придонного слоя моря и усиление плотностных течений [12, 13], при этом обновленные донные воды распространились по всей западной части Центральной котловины на глубинах 3000–3600 м слоем толщиной около 100–600 м и прослеживались на протяжении более года [9, 14].

Склоновая конвекция в заливе исследовалась с помощью численного моделирования [15]. Была показана возможность проникновения стекающих вод как в промежуточные, так и в глубинный и придонный слои моря в зависимости от интенсивности охлаждения вод на шельфе. Тем не менее прямой регистрации процесса каскадинга с помощью автономных измерительных систем ранее не проводилось.

Для изучения пространственно-временной структуры склоновой конвекции нами в период 2010-2019 гг. было выполнено несколько постановок автономных донных станций (АДС) на шельфе и в области склона залива Петра Великого в зимний сезон. В некоторые годы были выполнены СТД-съемки и серии съемок, что позволило зарегистрировать процесс каскадинга и определить его пространственно-временные характеристики. Результаты наиболее глубокого проникновения каскадинга, достигшего почти 2000 м, были представлены нами ранее [16, 17]. Тем не менее остаются вопросы о межгодовой изменчивости каскадинга, характерных районах в области склона и периодах его возникновения. Для ответа на эти вопросы ниже рассмотрим результаты наших наблюдений, выполненных в 2010-2014 гг.

Методы наблюдений

Исследование конвективных процессов в заливе Петра Великого в период 2010–2014 гг. проводилось в нескольких экспедициях ТОИ ДВО РАН на НИС «Профессор Гагаринский», «Луговое» и «Академик Опарин», в которых были установлены и подняты автономные донные станции, а также выполнены СТД-съемки области шельфа и континентального склона. Информация об АДС приведена в табл., а их положение показано на рис. 1.

Наибольшее количество постановок было сделано в центральной части склона залива, где имеются несколько каньонов, именуемых в литературе каньон Демина и долина Илишаевича [18]. Не имея точных сведений о расположении этих каньонов, в данной работе каньон в районе 131°48' в.д., где было поставлено наибольшее количество наших АДС, будем называть Центральным. Измерения также проводились западнее, в Гамовском каньоне, а также в восточной части залива к югу от о-ва Аскольд.

В большинстве случаев АДС представляли собой закрепленные на тросе приборы, поддерживаемые вертикально притопленной плавучестью и заякоренные на дне с помощью груза с использованием акустического размыкателя. Иногда применялись противотраловые защитные пластиковые корпуса (лендеры). Станции были оснащены различной ап-



Рис. 1. Расположение АДС в области склона залива Петра Великого в период 2010–2014 гг. Цифрами обозначены номера станций (см. таблицу), изобаты в метрах

№ ст	Широта, сев.	Долгота, вост.	Глубина, м	Дата постановки	Дата подъема	Состав измерительных приборов	Район
1	42°27,586'	131°59,677'	115	27.02.2010	14.03.2010	Аквалог, RBR, S4А	Шельф, центр
2	42°30,602'	131°47,737'	90	2.02.2011	6.04.2011	ADP250, SBE26	Шельф, центр
3	42°30,608'	131°47,588'	92	10.02.2012	17.04.2012	RBR620, ADP, Infinity AEM	Шельф, центр
4	42°25,724'	131°16,980'	94	21.11.2012	3.04.2013	SBE37, WHS300, лендер	Шельф, Гамов
5	42°30,583'	131°47,504'	92	21.11.2012	4.04.2013	SBE37, WHS 300, лендер;	Шельф, центр
6	42°30,778'	131°47,771'	91	28.12.2012	4.04.2013	RBR620, Infinity AEM	Шельф, центр
7	42°31,097'	132°18,948'	97	21.11.2012	10.06.2015	SBE37, WHS300, лендер	Шельф, Аскольд
8	42°19,860'	131°19,601'	1222	14.02.2013	4.04.2013	SBE19, S4, 15 м от дна	Склон, Гамов
9	42°30,697'	131°47,771'	94	23.12.2013	14.05.2014	RBR620, Infinity AEM	Шельф, центр
10	42°24,814'	131°47,307'	1150	23.12.2013	14.05.2014	SBE19	Склон, центр

Сведения о зимних постановках АБС в области склона залива Петра Великого в 2010-2014 гг.

паратурой для регистрации океанологических параметров (см. таблицу), расположенной на расстоянии 0,5–2 м над дном на шельфе и 4–10 м в случае глубоких постановок. В основном измерения проводились с дискретностью 0,5 часа на протяжении 2–5 месяцев. АДС устанавливались в ноябре–декабре (иногда в январе–феврале) и поднимались в апреле–июне. Для регистрации температуры и солености использовались логгеры SBE37, SBE26, ACTD-Lite и RBR Сопсето либо многопараметрические зонды в режиме логгера SBE19 и RBR620, оснащенные датчиками растворенного кислорода, мутности и флюоресценции. Иногда использовался оптический датчик кислорода Rinko ARO. Течения измерялись с помощью точечных датчиков S4, S4A, Infinity AEM и Aquadopp, а также доплеровских профилографов ADP250 и WHS300.

В первой постановке АДС вблизи кромки шельфа на долготе 132° в.д. (2010 г.) был применен вертикально перемещающийся по фалу профилограф «Аквалог» [19, 20]. В дальнейшем постановки на кромке шельфа были смещены чуть западнее к вершине Центрального каньона – около 42°30> с.ш. и 131°48' в.д. Зимой 2012–2013 гг. на кромке шельфа были поставлены три АДС: на западе, у Гамовского каньона, в центре и на востоке на траверсе о-ва Аскольд. В центре была поставлена дополнительная АДС с точечным датчиком течений для контроля допплеровского



Рис. 2. Подъем глубоководной АДС (слева) и шельфового лендера (справа)

профилографа. Восточную АДС (о-ва Аскольд) не удалось поднять с помощью штатного размыкателя. В итоге она простояла более 2.5 лет и была поднята подводным аппаратом Института биологии моря ДВО РАН. Этой же зимой была впервые поставлена глубоководная АДС в Гамовском каньоне на глубине 1222 м. Следующей зимой (2013–2014 гг.) проводились измерения на двух АДС в районе центрального каньона – на кромке шельфа и на глубине 1150 м. Следует отметить, что несмотря на сложности постановок все АДС были подняты без потерь и повреждения приборов.

При выполнении гидрологических съемок использовались СТД-зонды SBE 9plus и SBE-19plus. Первый из них имел двойной комплект датчиков температуры и электропроводности, а также датчики растворенного кислорода, мутности и флуоресценции. Наиболее детальные циклы наблюдений были выполнены на НИС «Профессор Гагаринский» в 2010 и 2012 гг. и НИС «Академик Опарин» в 2013 г. Они состояли из нескольких повторяющихся коротких съемок на протяжении периода январь—май. Дрейфующий лед и штормовые погодные условия не всегда позволяли выполнить всю запланированную схему съемки, но полученные результаты дали ценную информацию о зимних процессах на склоне залива и характеристиках каскадинга, которые будут рассмотрены ниже.

Характеристики зимних вод на шельфе залива

Из результатов предыдущих исследований [21–28] известно, что в зимний период на шельфе залива в результате охлаждения, испарения и льдообразования могут формироваться воды высокой плотности, которые, перемещаясь к кромке шельфа, скатываются вниз по склону и участвуют в вентиляции глубинных слоев моря. Неоднократные наблюдения подтверждают присутствие вод с отрицательной температурой и повышенной соленостью в нижней



Рис. 3. Схема СТД-съемок НИС «Профессор Гагаринский» (рейс №55) 8–10 февраля (а), 29 февраля–2 марта (б), 13–16 марта (в) и 16–19 апреля (г) 2012 г. Звездочкой показано положение АДС на кромке шельфа

части шельфа залива в зимний период вплоть до середины апреля [7, 8, 29].

Рассмотрим T,S-характеристики вод на шельфе залива и в области склона по результатам четырех СТД-съемок, выполненных в феврале–апреле 2012 г. (рис. 3).

Выполненные нами съемки залива зимой-весной 2012 г. позволяют рассмотреть более детально эволюцию холодных донных вод. Изменение характеристик вод вдоль разреза из вершины Уссурийского залива и далее по 132° в.д. к области склона показано на рис. 4.

Съемка 8–10 февраля (рис. 4, *a*, *б*) показывает, что воды с низкой температурой (-1,8–0,5 °C) и высокой

соленостью (33,9–34,5 епс) занимают всю область шельфа. При этом наиболее холодные воды находятся в верхней части Уссурийского залива. Наблюдения 29 февраля (рис. 3, *в*, *г*) показывают продвижение наиболее холодных вод (-1,8–0,5 °C) к средней части шельфа и формирование в придонном слое языка вод повышенной солености, направленного в сторону склона. Следующая съемка 13 марта (рис. 3, *д*, *е*) подтверждает продолжение перемещения придонных холодных и высокосоленых вод к кромке шельфа и одновременно повышение температуры воды в верхнем слое, указывающее на адвекцию в залив морских вод, очевидно, имеющую компенсационный характер. Съемка 16 апреля (рис. 4, *ж*, *з*) показывает даль-



Рис. 4. Распределение температуры воды (слева) и солености (справа) на разрезе, проходящем от вершины Уссурийского залива на юг вдоль 132 в.д. по данным СТД-съемок НИС «Профессор Гагаринский» (рейс №55) 8 февраля (*a*, *б*), 29 февраля (*e*, *a*), 13 марта (*д*, *e*) и 16 апреля (*ж*, *з*) 2012 г. Положение станций разреза показано на рис. 2 нейшее поступление более теплых морских вод в залив в верхнем слое и сохранение холодных и высокосоленых вод в придонном слое (<-0.5 °C; >34,0 епс).

Более подробно структура вод на шельфе по результатам наших съемок в зимние периоды 2010 и 2012 гг. рассмотрена в работах [30, 31]. Здесь для нас важно показать, что на шельфе залива регулярно формируются воды высокой плотности, достаточной для инициирования каскадинга на склоне. На рис. 5 представлена Т,S-диаграмма всех станций нашей съемки 2012 г. (четыре съемки с февраля по апрель, 222 станции).

Эти данные подтверждают, что в зимний период в вершине залива Петра Великого формируются воды чрезвычайно низкой температуры (менее -1,9°С) и высокой солености (более 34,75 епс), плотность который превышает 27,9 усл. ед. Наиболее холодные воды формируются в вершине Уссурийско-

го залива (UB), в то время как воды, вытекающие из Амурского залива (AB), несколько теплее за счет теплообмена в придонном слое [32, 33], но имеют наибольшую соленость. Воды залива Посьет (PB) имеют заметно меньшую соленость, чем воды кутовой части Уссурийского залива, но достаточно высокую плотность. По мере продвижения донных высокоплотных вод к кромке шельфа их соленость понижается (SH) за счет смешения с холодными, но менее солеными водами центральной части залива. Вблизи кромки шельфа также присутствуют воды с низкой температурой и низкой соленостью, плотность которых ниже плотности промежуточных вод Японского

моря. Но уже плотность вод с соленостью более 33,9 и охлажденных ниже -0,5°С превышает плотность как поверхностных, так и промежуточных вод моря, прилегающих к склону, что создает благоприятные условия для каскадинга.

Несмотря на сохранение общих закономерностей, пространственно-временная структура вод на шельфе в течение сезона изменчива и характеризуется короткопериодными вариациями. Одной из причин этого являются мезомасштабные вихри, которые могут переносить порции захваченных вод высокой плотности из вершины залива к склону, как показано в недавней работе [20].



Рис. 5. Т,S-диаграмма вод залива Петра Великого по данным СТД-съемок НИС «Профессор Гагаринский» (рейс № 55) в период февраль–апрель 2012 г. UB – Уссурийский залив; АВ – Амурский залив; РВ – залив Посьет; SH –кромка шельфа; SW – поверхностные воды открытого моря; IW – промежуточные воды открытого моря; BW – донные воды Центральной глубоководной котловины Японского моря

Изменчивость характеристик вод на кромке шельфа

<u>Зима 2010–2011 гг.</u>

Первые продолжительные измерения изменчивости температуры воды и солености на кромке шельфа в районе Центрального каньона были выполнены нами в период со 2 февраля по 6 апреля 2011 г. (рис. 6). Измерения проводились на глубине 90 м (АДС 2 на рис. 1 и в таблице).

Несмотря на визуально кажущееся преобладание участков синхронного и противофазного изменения



Рис. 6. Изменение температуры воды (красная кривая) и солености (синяя кривая) в придонном слое вблизи кромки шельфа залива Петра Великого по данным АДС в период 2 февраля –6 апреля 2011 г. Шкала температуры (°C) показана слева, солености (епс) – справа. Горизонтальный оранжевый пунктир - периоды возможного каскадинга

температуры воды и солености, корреляция этих двух рядов невысока и характеризуется коэффициентом -0,16. Это связано с различием во вкладе в вариации солености вод шельфа и открытого моря. Подход к кромке холодных шельфовых вод с севера, из вершины залива, проявлялся в понижении температуры воды, регистрируемой АДС, а адвекция вод открытого моря с юга – наоборот, в ее повышении. Вклад в изменение солености был более сложным: в начале февраля и в конце марта морские воды имели более высокую соленость, а во второй половине февраля и первой половине марта наибольшую соленость приносили донные воды шельфа.

Уже в момент постановки АДС в этой точке наблюдались воды с отрицательной температурой (до -1,8°С), но их соленость была недостаточно высокой (< 33,9 епс) для начала каскадинга. Достаточные условия сложились в период с 11 февраля по 16 марта, когда к точке подходили шельфовые воды с соленостью более 39,0 епс и температурой -1.7–1,5 °С. Тогда было зарегистрировано 4 эпизода подхода вод шельфа высокой плотности, продолжительностью по 2–7 суток. Наиболее соленые воды (> 34,1 епс) наблюдались с 8 по 14 марта. Следующий период, благоприятный для каскадинга, наблюдался 30 марта – 1 апреля, когда АДС зарегистрировала воды с температурой до -0,8°С и соленостью 33,9–34,0 епс. В дальнейшем прохождения вод с отрицательной температурой не наблюдалось. Таким образом, периодом возможного каскадинга можно считать 11 февраля – 1 апреля 2011 г.

<u>Зима 2011–2012 гг.</u>

Следующей зимой в этой же точке была установлена АДС, на которой кроме температуры воды и солености проводилась регистрация мутности и флуоресценции хлорофилла-а (АДС 3 на рис. 1 и в таблице). Измерения проводились в период 10 февраля – 17 апреля 2012 г. (рис. 7). Наиболее значительным событием был подход холодных донных вод шельфа к кромке в период с 19 февраля по 10 марта (рис. 7, *a*, δ). На протяжении 20 суток с небольшими перерывами 25–26 февраля и 6–7 марта, обусловленными вторжениями более теплых морских вод, в точке АДС располагались воды с температурой менее -1,5°С и соленостью более 34,1 епс (с экстремальны



Рис. 7. Изменение температуры воды (а), солености (б), мутности (в) и хлорофилла-а (г) в придонном слое вблизи кромки шельфа залива Петра Великого по данным АДС в период 10 февраля – 17 апреля 2012 г. Горизонтальный оранжевый пунктир – периоды возможного каскадинга. Вертикальными пунктрирными линиями отмечены моменты судовых СТД-зондирований в районе АДС, результаты которых представлены на рис. 12

ми значениями до -1,75°С и 34,31 епс), плотность которых превышала 27,44 усл. ед., в то время как плотность донных вод Японского моря на глубинах более 3000 м составляет 27,35–27,37 усл. ед. [11]. Следующий продолжительный эпизод подхода холодных вод отмечался с 28 марта по 6 апреля. Их минимальная температура достигала только -0,8–1,0°С, а соленость несколько ниже – 34,09 епс, но этого было достаточно для развития каскадинга.

Наблюдения также показывают эпизоды значительного и резкого увеличения мутности вод с пиками, превышающими типичные значения 0,1–0,2 ЕМФ в десятки и даже сотни раз (рис. 7, *в*). Продолжительность таких всплесков мутности составляла от нескольких часов до 1–2 суток. Они были связаны с резкими усилениями или изменением направления течений. Хотя и не во всех случаях эта связь проявлялась устойчиво. Типичные скорости течений составляли 10–15 см/с, возрастая в некоторых случаях до 22–25 см/с. Резкое понижение температуры воды 19 февраля, начало подхода холодных шельфовых вод было связано со сменой течений северо-восточного направления, преобладавших с 14 января, на юго-западные. В этот же период отмечается пик мутности воды. Самый продолжительный пик мутности отмечался 6-7 марта в период смены юго-западных течений на северо-западные и вторжения более теплых морских вод. В то же время аналогичная ситуация 25-26 февраля, наоборот, сопровождалась понижением мутности вод (рис. 7, а, в). Заметное общее фоновое увеличение мутности произошло со второй половины марта и, очевидно, было связано с развитием фитопланктона, что подтверждается ходом хлорофилла-а (рис. 7, г). Резкое увеличение концентрации хлорофилла-а указывает на интенсивное цветение фитопланктона в апреле, что, очевидно, привело к биообрастанию датчика электропроводности и ошибочному занижению значений солености, заметному на рис. 7, б.

<u>Зима 2012–2013 гг.</u>

Для выяснения межгодовой изменчивости подхода высокоплотных шельфовых вод к кромке была повторена постановка АДС в районе центрального каньона в зимний период 2012–2013 гг. Кроме того, для анализа пространственной структуры каскадин-



Рис. 8. Изменение температуры воды (а), солености (б), мутности (в) и хлорофилла-а (г) в придонном слое вблизи кромки шельфа центральной части залива Петра Великого по данным АДС в период 28 декабря 2012 г. – 4 апреля 2013 г. Горизонтальный оранжевый пунктир – периоды возможного каскадинга

га еще две АДС были поставлены на кромке шельфа – в западной части залива у Гамовского каньона и в восточной части на траверсе о-ва Аскольд (станции 4–7 на рис. 1 и в таблице). Изменение придонной температуры воды вблизи кромки шельфа по данным АДС, установленной в той же точке около Центрального каньона, что и в зимы 2011–2012 гг., показано на рис. 8. На этот раз измерения были начаты раньше, в конце ноября, и продолжались до 4 апреля (на рис. 8 показаны данные с 28 декабря).

Анализ изменения температуры воды и солености (рис. $8, a, \delta$) показывает, что, несмотря на эпизоды подхода вод низкой температуры (до -1,5-0,5 °C), сформированных в результате охлаждения на шельфе, в течение января-начала февраля их соленость была сравнительно низкой (около 33,8 епс) и недостаточной для начала склоновой конвекции. Такие эпизоды отмечались, например, 27-30 января и 9-11 февраля. И только 17-21 февраля подошли холодные воды с соленостью, превышающей 33,9 епс, а в более продолжительный период – с 25 февраля по 24 марта – температура донных вод достигала -1,7 °С, а соленость 34,09 епс, чего достаточно для развития склоновой конвекции. Таким образом, условия, благоприятные для каскадинга, сохранялись практически месяц. После перерыва в 9 суток в связи с адвекцией теплых морских вод (0,5 °C) к 1 апреля снова подошли холодные и высокосоленые донные воды (-1,4 °С и 34,0-34,06 епс), инициирующие каскадинг.

Также, как и предыдущей зимой (см. рис. 7), отмечалось два продолжительных периода повышения мутности донных вод (рис. 8, *в*) – около 16–29 февраля и с 8 марта по конец наблюдений. Сопоставление с

ходом флуоресценции хлорофилла-а (рис. 8, *г*), показывает, что кроме подхода высокоплотных донных вод из вершины залива и интенсификации течений вклад в повышение мутности вносило и интенсивное цветение планктона.

АДС, поставленная западнее, в районе Гамовского каньона (АДС 4 на рис. 1 и в таблице), показала схожий характер изменения океанографических параметров и высокую корреляцию (0,88 по температуре и 0,65 по солености) с данными АДС около центрального каньона, рассмотренной выше (рис. 8). Однако есть и некоторые различия. Можно отметить, что как эпизоды адвекции относительно теплых морских вод (например, 16–18 декабря), так и подхода холодных шельфовых вод (например, 25–28 января и 8–10 февраля), отмечались в центре на 2–3 суток раньше, чем на западе. В то же время подход холодных вод 20–22 февраля происходил практически синхронно как у Центрального, так и у Гамовского каньонов. Эпизоды подхода холодных шельфовых вод в период 26 февраля – 10 марта отмечались на обеих АДС, хотя и по-разному. Но если в центре они продолжались и после 15 марта, вплоть до подъема станций 3 апреля, то у Гамовского каньона они в это время более не наблюдались. Таким образом, события подхода шельфовых вод с температурой менее -1°С продолжительностью от 1 до 10 суток отмечались у Гамовского каньона 6 раз, а в центре – 9.

Изменчивость характеристик вод на континентальном склоне

Выше было показано, что донные станции, установленные около кромки шельфа, ежегодно регистрируют подход холодных вод, плотность которых достаточна для процесса каскадинга вниз по склону. На какую глубину и как часто могут скатываться эти воды? Для выяснения этого зимой 2013 г. была впервые поставлена глубоководная АДС в Гамовском каньоне на глубине 1222 м (станция 8 на рис. 1 и в таблице). Результаты измерений показаны на рис. 9. Для сравнения там же показано изменение температуры воды на кромке шельфа вблизи вершины каньона (АДС 4 на рис.1). Характер изменчивости на шельфе подобен тому, что отмечался на АДС 5 в центральной части залива, рассмотренному выше (рис. 8). Исключение составляет подход холодных вод в начале апре-



Рис. 9. Изменение температуры воды (°С) в придонном слое у кромки шельфа (кривая 1, шкала справа) и на континентальном склоне на глубине 1222 м (кривая 2, шкала слева) в западной части залива Петра Великого на траверзе мыса Гамова в период 14.02–3.04.2013 г.

ля, зарегистрированный в центральной части (рис. 8, *a*), но не наблюдавшийся у Гамовского каньона (рис. 9, кривая 1).

Несмотря на продолжительные эпизоды подхода вод высокой плотности к кромке шельфа, отмечавшиеся во второй половине февраля и марте, на глубине 1222 м в Гамовском каньоне каких-либо резких изменений температуры воды не наблюдалось (кривая 2 на рис. 9). На протяжении всего периода измерений (48 сут.) температура изменялась в пределах 0,26-0,42 °С с короткопериодными флуктуациями 0,04-0,06 °С, вероятно, приливного характера. Несмотря на то что прямого проникновения каскадинга до глубины более 1000 м по склону каньона зарегистрировано не было, можно отметить увеличение амплитуды короткопериодных колебаний в моменты подхода наиболее холодных шельфовых вод и предполагаемого развития каскадинга (19.02-20.03.2013 г.).

Следующей зимой АДС были установлены на кромке шельфа около центрального каньона и на склоне на глубине 1150 м (9 и 10 на рис. 1 и в таблице). Изменение температуры воды по результатам этих измерений в период с 23.12.2013 г. по 12.05.2014 г. показаны на рис. 10. Так же, как и в предыдущие зимы, в январе не отмечалось подхода к кромке достаточно плотных вод. Благоприятные для каскадинга условия наблюдались с 19 февраля и продолжались по 6 мая (!) 2014 г. За это время произошло несколько эпизодов подхода холодных и высокосоленых вод продолжительностью 3–10 суток. Максимальная соленость (рис. не показан) отмечалась во второй половине марта и достигала 34,13 епс.

Наиболее важный результат этой серии – первый случай регистрации каскадинга на глубине более 1 км. 25 февраля АДС на глубине 1150 м зарегистрировала прохождение скатывающихся вод с температурой ниже -0,1 °С (кривая 2, участок 3 на рис. 10). Этот процесс проявлялся в виде резкого изменения температуры и солености воды с 0.25–0.26 °С до -0.14 °С. Продолжительность прохождения аномальных вод составляла всего около 12 часов. Это был единственный случай за весь период наблюдений в 141 день. В это время на кромке шельфа уже на протяжении 5 дней (с 19 февраля) присутствовали аномально холодные воды, что, по-видимому, и инициировало глубокий каскадинг.



Рис. 10. Изменение температуры воды (°С) в придонном слое у кромки шельфа (кривая 1, шкала справа) и на континентальном склоне на глубине 1150 м (кривая 2, шкала слева) в центральном каньоне залива Петра Великого в период 23.12.2013г. – 12.05.2014 г. 3 – аномальное понижение температуры воды на глубине 1150 м, обусловленное каскадингом

Вертикальная структура вод на кромке шельфа

Выше рассмотрено изменение характеристик вод по данным АДС на кромке шельфа залива и на континентальном склоне в придонном слое. Для анализа вертикальной структуры вод и ее изменчивости на протяжении зимнего периода рассмотрим вертикальные профили океанологических характеристик по результатам СТД-зондирований. Наиболее информативные результаты были получены в зимний сезон 2012 г. (рис. 11). Так, зондирование, выполненное 10 февраля, до подхода шельфовых вод высокой плотности, указывает на сильное охлаждение всей толщи вод до отрицательных температур (-1,3–0,3°С) с более теплым слоем вод ниже 65 м, очевидно, сформированным адвекцией со стороны моря. Однако соленость этих вод была низкой (33,82-33,90 епс). Высокое содержание растворенного кислорода (рис. 11, в) подтверждает интенсивное вертикальное перемешивание. Профиль от 1 марта, выполненный в период подхода холодных высокосоленых вод, имел ступенчатую структуру. Он показывает придонный слой вод, стекающих из вершины залива, толщиной 10-12 м со значениями солености, превышающими 34,4 епс, температурой менее -1,5°С, повышенными мутностью и содержанием кислорода. Однако воды, расположенные выше горизонта 60 м, имели положительную температуру (0,2-0,3°С), сравнительно низкие соленость, мутность и содержание кислорода, что указывает на их морское происхождение. Таким образом, наблюдается компенсационная схема водообмена, когда в придонный слой стекают шельфовые воды повышенной плотности, а в верхнем слое в залив поступают более теплые и менее соленые морские воды. Профиль за 15 марта, полученный в период слабых течений, показывает однородное вертикальное распределение характеристик вод, указывающее на хорошее вертикальное перемешивание. При этом отмечаются повышенные значения содержания кислорода, мутности и хлорофилла-а, что можно объяснить началом весеннего цветения фитопланктона во всей толще вод. Более интенсивное цветение фитопланктона зарегистрировано 17 апреля (рис. 11, д). При этом максимум хлорофилла-а располагается под слоем уже сформировавшегося термоклина (20-30 м). Очевидно, деятельность фитопланктона определяет и экстремально высокое содержание кислорода в верхнем слое 0-50 м. Хорошее совпадение профилей мутности и флуоресценции 15 марта и 17 апреля указывает на то, что они в этот период связаны с развитием планктона. В

то же время, придонный слой повышенной мутности 1 марта никак не выделяется на профиле флуоресценции. Таким образом, можно заключить, что повышенная мутность стекающих по шельфу вод высокой плотности определяется переносимыми в этом слое частицами взвеси.

Т,S-диаграмма всех четырех СТД-профилей (рис. 11, *e*) показывает, что съемка 1 марта (кривая 2) зафиксировала период подхода к АДС наиболее холодных и высокосоленых шельфовых вод, плотность которых превышала плотность донных вод глубоководной котловины. Однако толщина слоя этих вод составляла лишь 10-12 м (рис. 9, а-г). Следующая съемка (15 марта, кривая 3) зарегистрировала охлаждение всей толщи вод (92 м) в районе АДС до -0,5-0,3°С и повышение солености до 33,94 епс. При этом плотность была несколько ниже, чем 1 марта, но превосходила плотность вод открытого моря, что допускало развитие каскадинга. Несмотря на то что по судовым наблюдениям эпизоды подхода вод, способных инициировать каскадинг, были зарегистрированы лишь дважды, однако, как видно из данных



Рис. 11. Изменение вертикальной структуры вод в районе постановки АДС на кромке шельфа в период с февраля по апрель 2012 г. Профили температуры воды (а), солености (б), содержания растворенного кислорода (в), мутности (г), флуоресценции (д) и Т,S-диаграмма (е) по результатам СТД-зондирований 10 февраля (1), 1 марта (2), 15 марта (3) и 17 апреля (4) 2012 г. ВW – Т,S-индекс донных вод глубоководной котловины Японского моря

наблюдений АДС (рис. 7), в придонном слое такие условия сохранялись продолжительное время в периоды 19 февраля – 10 марта и 28 марта – 6 апреля, с перерывами, обусловленными адвекцией более теплых морских вод. Таким образом, в эти периоды каскадинг мог происходить неоднократно. Это предположение подтверждается результатами СТД-зондирований в области континентального склона, рассматриваемыми ниже.

Аномалии вертикальной структуры вод в области континентального склона

СТД-съемки зимы-весны 2012 г (см. рис. 3), выполненные над областью континентального склона, указывают на аномалии в вертикальном распределении характеристик вод, которые, вероятнее всего, обусловлены каскадингом (рис. 12). Серым цветом на рисунках показаны все вертикальные профили, полученные в результате СТД-зондирований над областью склона (см. рис. 3). Цветом выделены характерные профили для каждого из трех первых этапов экспедиции. Все зондирования, выполненные 8-10 февраля (12 станций), до подхода высокоплотных донных вод к кромке шельфа, демонстрируют плавное изменение температуры воды (рис. 12, a), солености (рис. 12, δ) и содержания кислорода (рис. 12, в) с глубиной (зеленые кривые). Но уже на профилях, полученных 1-2 (синий цвет) и 14-16 марта (красный цвет), заметно значительное количество интрузионных слоев с пониженными значениями температуры воды и солености и повышенным содержанием кислорода, которые трудно объяснить иначе как стеканием шельфовых

вод в результате склоновой конвекции. Интрузии имели типичную толщину 50–150 м. Большинство из них отмечалось в слое 200–1500 м. Однако заметные аномалии, наиболее наглядно проявляющиеся на профилях солености и содержания кислорода, выделяются вплоть до глубин 2000–2800 м, что указывает на проникновение каскадинга вплоть до подножья континентального склона.

Заключение

По результатам измерений на АДС и судовых СТД-съемок в зимние сезоны 2010-2014 гг. установлено, что ежегодно в феврале-марте отмечается несколько эпизодов подхода вод низкой температуры и высокой солености (соответственно, высокой плотности) из верхней части залива Петра Великого к кромке шельфа. Плотность этих вод превышает плотность вод открытого моря, и они могут скатываться вниз по склону, инициируя каскадинг. За сезон может наблюдаться 4-8 таких эпизодов, продолжительностью от нескольких часов до 6-10 суток, с перерывами, обусловленными адвекцией более теплых морских вод. Наиболее благоприятные условия для каскадинга отмечаются в конце февраля-марте. Поздний эпизод присутствия аномально холодных вод был отмечен с 25 апреля по 6 мая в 2014 г. Сложно сказать, является ли это характерным, так как в другие годы наблюдения в это время не проводились и заканчивались в начале-середине апреля.

Одновременная регистрация в центре и в западной части залива (Гамовский каньон) показала, что адвекция морских вод фиксируется в центральной



Рис. 12. Характерные вертикальные профили температуры (а), солености (б) и растворенного кислорода (в) по результатам СТД-зондирований на склоне залива Петра Великого 8–10 февраля (зеленая линия), 1–2 марта (синяя линия) и 14–16 марта (красная линия). Серым фоном показаны все профили, полученные в области склона в трех этапах экспедиции (см. рис. 3)

части на 2–3 суток раньше, чем на западе, что соответствует переносу вод Приморским течением. В начале и в конце сезона поступление шельфовых вод с севера отмечается в центре залива также на 2–3 суток раньше, чем у Гамовского каньона. Однако в период максимального формирования холодных вод (конец февраля) их подход к кромке шельфа в центре и на западе происходит практически синхронно.

В периоды подхода холодных шельфовых вод к кромке отмечается повышение мутности воды в придонном слое, на фоне которого наблюдаются кратковременные эпизоды резкого повышения мутности продолжительностью от нескольких часов до 1-2 суток, как правило, связанные с резкой сменой или усилением течений. Заметное общее фоновое увеличение мутности по всей толще вод отмечается в марте – апреле и связано с увеличением концентрации хлорофилла-а, указывающим на цветение планктона. В обоих случаях регистрации хлорофилла-а (2012 и 2013 гг.) отмечалось два пика его концентрации, однако они имели межгодовые различия. Если в 2012 г. первый пик был в середине марта, а второй – в начале апреля, то в 2013 г. они наблюдались раньше – в конце февраля и в середине марта соответственно.

Несмотря на частое и продолжительное присутствие холодных шельфовых вод на кромке, проявление каскадинга на склоне было зарегистрировано по данным АДС только однажды. АДС, установленная на глубине 1150 м, зарегистрировала проникновение холодных вод с температурой до -0.14°C 25 февраля 2014 г. Продолжительность этого эпизода составила всего около 12 часов, несмотря на присутствие шельфовых вод с низкой температурой вблизи кромки на протяжении нескольких суток (18-26 февраля). Это указывает на эпизодичность проникновения каскадинга в придонный и глубинные слои моря и более частую адвекцию в промежуточные слои. С другой стороны, редкость регистрации каскадинга на склоне и кратковременность этого события может быть результатом неудачного расположения АДС. Последующие наши постановки вдоль оси центрального каньона в 2016-2018 гг. показали более продолжительное и глубокое проникновение каскадинговых вод [16, 17].

Регулярное проникновение каскадинга в глубинный и придонный слои моря подтверждается результатами СТД-измерений, выполненных в области континентального склона в 2012 г. На это указывает значительное количество интрузионных слоев с пониженными значениями температуры воды и солености и повышенным содержанием растворенного кислорода, появившихся в конце февраля-начале марта и отсутствовавших в начале февраля. Интрузии имели типичную толщину 50–150 м, а в некоторых случаях 250 м. Их присутствие вплоть до глубин 2000–2800 м указывает на проникновение каскадинга до подножья континентального склона. Однако, несмотря на это, наши СТД-измерения в северо-западной части моря в июне 2012 г. не показали каких-либо заметных следов вентиляции придонных вод глубоководных котловин, подобных тем, что были зарегистрированы после зимы 2000-2001 гг. [9, 10, 11]. Очевидно, в аномально холодный зимний период 2000-2001 гг. каскадинг проникал глубже и вентилировал придонный слой котловины, в то время как в последующие более теплые зимы происходила вентиляция промежуточного слоя вод. Это также представляется существенным, так как в этом слое переносятся воды повышенной солености и воздействие каскадинга на склоне залива Петра Великого будет приводить к понижению их T,S-индексов.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы ТОИ ДВО РАН № 121021700346-7. Значительная часть работ по подготовке оборудования и выполнению морских исследований обеспечивалась недавно ушедшим от нас зав. сектором ТОИ ДВО РАН А.А. Ворониным, которому авторы глубоко благодарны. Авторы благодарят сотрудников ТОИ ДВО РАН, принимавших участие в отдельных этапах работ, – Д.Д. Каплуненко и Т.А. Гуленко, а также научные составы, экипажи и капитанов экспедиций на НИС «Профессор Гагаринский», «Луговое», «Академик Опарин» и «Академик М.А. Лаврентьев», самоотверженно выполнявших работы в тяжелых зимних условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ivanov V.V., Shapiro G.I., Huthnance J.M., Aleynik D.L., Golovin P.N. Cascades of dense water around the world ocean // Progress in Oceanography. 2004. Vol. 60, No. 1. P. 47–98.

2. Nitani H. On the deep and bottom waters in the Japan Sea // Researches in Hydrography and Oceanography / ed. by D. Shoji; Hydr. Dep. of Japan Maritime Safety Agency. Tokyo, 1972. P. 151–201.

3. Gamo T., Nozaki Y., Sakai H., Nakai T., Tsubota H. Spatial and temporal variations of water characteristics in the Japan Sea bottom layer // Mar. Res. 1986. Vol. 44. P. 781–793.

4. Vasiliev A.S., Makashin V.P. Ventilation of the Japan Sea waters in winter // La Mer. 1992. Vol. 30. P. 169-177.

5. Ponomarev V. I., Zuenko Y.I. Ventilation on the Japan Sea by slope convection // PICES Workshop on the Okhotsk Sea and Adjacent Areas. Abstracts. Vladivostok, 1995. P. 81–82.

6. Зуенко Ю.И. Промысловая океанография Японского моря. Владивосток: ТИРНО-центр, 2008. 227 с.

7. Zuenko Y.I. Year-to-year changes of dense bottom water spreading in Peter the Great Bay shelf (the Japan Sea) and possibility of cascading // In: Oceanic fronts and related phenomena – Konstantin Fedorov Memorial Symposium. St.-Petersburg, Pushkin. 1998. P. 631–635.

8. Лобанов В.Б., Салюк А.Н., Тищенко П.Я. и др. Комплексная япономорская экспедиция: Отчет о работах в 32-м рейсе НИС «Павел Гордиенко» с 14 по 23 апреля 1999 г. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 1999. 173 с.

9. Lobanov V., Salyuk A., Ponomarev V., Talley L., Kim K., Kim K-R, Tishchenko P., Nedashkovskiy A., Kim G., Sagalaev S. Renewal of bottom water in the Japan/East sea // Proc. 17th Int. Symp. Okhotsk Sea & Sea Ice. Japan: OSCORA. 2002. P. 31–36.

10. Kim K.-R., Kim G., Kim K., Lobanov V., Ponomarev V., Salyuk A. A sudden bottom-water formation during the severe winter 2000–2001: The case of the East/Japan Sea // Geophysical Research Letters. 2002. Vol. 29, No. 8. DOI:14498 (10.1029/2001GLO14498).

11. Talley L.D., Lobanov V.B., Ponomarev V.I., et al. Deep convection and brine rejection in the Japan Sea // Geophys. Res. Lett. 2003. Vol. 30, No. 4. P. 1–4. DOI: 10.1029/20002GL016451.

12. Senjyu T., Aramaki T., Otosaka S., Togawa O., Danchenkov M., Karasev E., Volkov Yu. Renewal of the bottom water after the winter 2000-2001 may spin-up the thermohaline circulation in the Japan Sea // Geophysical Research Letters, 2002. Vol. 29, No. 7.

13. Tsunogai S., Kawada K., Watanabe S., Aramaki T. CFC indicating renewal of the Japan Sea deep water in winter 2000-2001 // J. Oceanography, 2003. Vol. 59. P. 685–693.

14. Lobanov V., Ponomarev V., Salyuk A., Sergeev A., Tishchenko P., Kaplunenko D., Sagalaev S., Voronin A. Variability of the Japan/East Sea bottom water // Proc. Int. Workshop on Marginal Seas in Change: the East Sea and the Mediterranean Sea. Seoul, Korea, 2012. P. 49–58.

15. Tanaka K. Formation of bottom water and its variability in the northwestern part of the Sea of Japan // J. Geophys. Res. Oceans. 2014. Vol. 119. P. 2081–2094. DOI:10.1002/2013JC009456.

16. Лобанов В.Б., Сергеев А.Ф., Навроцкий В.В., Воронин А.А., Горин И.И., Павлова Е.П. Инструментальные наблюдения каскадинга на склоне залива Петра Великого Японского моря // Тр. конф.: «Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2019)». Т. 1. М.: ИО РАН, 2019. С. 104–108.

17. Навроцкий В.В., Лобанов В.Б., Сергеев А.Ф., Воронин А.А., Горин И.И., Павлова Е.П. Динамическая структура каскадинга в заливе Петра Великого (Японское море) // Океанологические исследования. 2020. Т. 48, № 3, С. 148–163

18. Карнаух В.Н. Рельеф дна западной части Японского моря // Геоморфология. 2011. №2. С. 78-84.

19. Ostrovskii A., Lobanov V., Sergeev A., Park J., Park Y. Moored profiler observations of submesoscale cold-core eddies in Peter the Great Bay of the East/Japan Sea in late winter // Управление рисками в прибрежной зоне в условиях меняющегося мира. St.-Petersburg: Academus Publishing, 2017. C. 1–1. DOI: 10.31519/conferencearticle 5b1b937b64aa12.88436521

20. Fayman P., Ostrovskii A., Lobanov V., Park J.-H., Park Y.-G., Sergeev A. Submesoscale eddies in Peter the Great Bay of the Japan/East Sea in winter // Ocean Dynamics. 2019. Vol. 69. P. 443-462. DOI: 10.1007/s10236-019-01252-8.

21. Ластовецкий Е.И., Вещева В.М. Гидрометеорологический очерк Амурского и Уссурийского заливов/ под ред. Л.Н. Заокопной; Приморское управление гидрометеорологической службы. Владивосток, 1964. 264 с.

22. Супранович Т.И., Якунин Л.П. Гидрология залива Петра Великого // Тр. ДВНИГМИ. 1976. № 22. 199 с.

23. Данченков М. А., Фельдман К. Л., Файман П. А. Температура и соленость вод залива Петра Великого // Тематический вып. ДВНИГМИ №4. Владивосток: Дальнаука, 2003. С. 10–25.

24. Ростов И.Д. и др. Залив Петра Великого // Физико-географические, гидрологические характеристики и гидрометеорологические условия. Владивосток, 2005. URL: http://www.pacificinfo.ru/data/cdrom/ 3 html/1_00.htm. (дата обращения:

25. Григорьев Р.В., Зуенко Ю.И. Среднемноголетнее распределение температуры и солёности в Амурском заливе Японского моря // Изв. ТИНРО. 2005. Т. 143. С. 179–188.

26. Лучин В.А., Тихомирова Е.А., Круц А.А. Океанографический режим вод залива Петра Великого (Японское море) // Изв. ТИНРО. 2005. Т. 140. С. 130–169.

27. Лучин В.А., Сагалаев С.Г. Океанологические условия в Амурском заливе (Японское море) зимой 2005 г. // Изв. ТИНРО. 2006. Т. 143. С. 203–218.

28. Лучин В.А., Тихомирова Е.А. Типовые распределения океанографических параметров в заливе Петра Великого (Японское море) // Изв. ТИНРО. 2012. Т. 169. С. 134–146.

29. Юрасов Г.И., Ванин Н.С., Рудых Н.И. Особенности гидрологического режима залива Петра Великого в зимний период // Изв. ТИНРО, 2007. Т. 148. С. 211–220.

30. Лобанов В.Б., Сергеев А.Ф., Тищенко П.Я., Гуленко Т.А., Каплуненко Д.Д., Лазарюк А.Ю., Сагалаев С.Г., Тищенко П.П., Швецова М.Г., Воронин А.А., Горин И.И., Дубина В.А., Шербинин П.Е., Агапова А., Семочкина Т., Торгунова Н., Островский А., Орлова Т.Ю. Характеристики вод залива Петра Великого в зимний период // Тр. региональной научной конференции "Океанография залива Петра Великого". Владивосток: ДВНИГМИ, 2012. С. 37–45.

31. Lobanov V., Sergeev A., Gorin I., Shcherbinin P., Voronin A., Kaplunenko D., Popov O., Gulenko T. Observations of dense water cascading along the Peter the Great Bay slope in the northwestern Japan Sea // Int. Conf. Fluxes and Structures in Fluids. Selected Papers / Eds.Yu.D. Chashechkin, V.G.Baydulov. M: MAKS Press, 2014. P. 142–150.

32. Лазарюк А.Ю., Лобанов В.Б., Пономарев В.И. Эволюция термохалинной структуры вод Амурского залива в холодный сезон // Вестн. ДВО РАН. 2013. № 6. С. 59–70.

33. Буров Б.А., Лазарюк А.Ю., Лобанов В.Б. Исследование теплового потока на границе вода-донные осадки в Амурском заливе Японского моря в зимний период // Океанология. 2014. Т. 54, № 6. С. 744–753.

Для цитирования:

Лобанов В.Б., Сергеев А.Ф., Горин И.И., Щербинин П.Е., Семкин П.Ю. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАСКАДИНГА НА КОНТИНЕНТАЛЬНОМ СКЛОНЕ В ЗАЛИВЕ ПЕТРА ВЕЛИКОГО // Подводные исследования и робототехника. 2023. №. 3 (45). С. 56-72. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_45_03_06. EDN: BDSIHQ.

Об авторах

- **ЛОБАНОВ Вячеслав Борисович,** к.г.н., заведующий лабораторией
- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041 г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: океанология, климат, инструментальные наблюдения в океане, дистанционное зондирование Тел.: +7(423) 231-1400, факс: +7(423) 231-2573

E-mail: lobanov@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0001-9104-5578

СЕРГЕЕВ Александр Фёдорович, с.н.с.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041 г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: океанология, радиоизотопы, инструментальные наблюдения в океане

Тел.: +7(423) 231-1400, факс: +7(423) 231-2573 E-mail: sergeev@poi.dvo.ru

ГОРИН Игорь Иванович, ведущий инженер-электроник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041 г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: океанология, инструментальные наблюдения в океане

Тел.: +7(423) 231-1400, факс: +7(423) 231-2573 E-mail: gorin@poi.dvo.ru

ЩЕРБИНИН Павел Евгеньевич, ведущий инженер-программист

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041 г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: компьютерное программирование, инструментальные наблюдения в океане

Тел.: +7(423) 231-1400, факс: +7(423) 231-2573 E-mail: p_shch@poi.dvo.ru

СЕМКИН Павел Юрьевич, к.г.н., заведующий лабораторией Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041 г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: океанология, гидрохимия, инструментальные наблюдения в океане

Тел.: +7(423) 231-1400, факс: +7(423) 231-2573 E-mail: pahno@poi.dvo.ru





DOI: 10.37102/1992-4429_2023_45_03_06

EXPERIMENTAL STUDY OF CASCADING ON THE CONTINENTAL SLOPE IN PETER THE GREAT BAY

V.B. Lobanov, A.F. Sergeev, I.I. Gorin, P.E. Shcherbinin, P.Yu. Semkin

The process of along the slope gravity current of high-density waters formed on the shelf in winter is known as a slope convection or cascading. In the Japan Sea a cascading is observed on the slope of Peter the Great Bay and is believed to be the main mechanism of deep and bottom water ventilation. The present work demonstrates the results of direct observations of cascading in the winter periods of 2010-2014, recorded with the help of bottom mooring stations (BMS) and ship CTD surveys. First time demonstrated a regularity, location, depth and interannual variability of cascading. The approach of cold shelf waters to the shelf edge observes every year, mainly in February-March, although some cases were recorded in April and even early May. Despite of this the only one cascading case was recorded by the BMS at the slope deeper than 1 km. At the same time, a significant number of intrusive layers observed by the CTD casts in the continental slope area indicates the penetration of cascading up to the foot of the continental slope (2800-3000 m).

Keywords: slope convection, cascading, Peter the Great Bay, continental slope, shelf, bottom mooring station.

References

1. Ivanov, V.V., Shapiro, G.I., Huthnance, J.M., Aleynik, D.L. and Golovin, P.N. (2004). Cascades of dense water around the world ocean. Progress in Oceanography, 60 (1), 47-98.

2. Nitani, H., On the deep and bottom waters in the Japan Sea. In: Researches in Hydrography and Oceanography, ed. by D. Shoji, Hydr. Dep. of Japan Maritime Safety Agency, Tokyo, 1972, p. 151–201.

3. Gamo T., Y. Nozaki, H. Sakai, T. Nakai and H. Tsubota (1986) Spatial and temporal variations of water characteristics in the Japan Sea bottom layer, J. Mar. Res., 44, 781-793, 1986.

4. Vasiliev A.S., Makashin V.P. Ventilation of the Japan Sea waters in winter. La Mer, 1992. V. 30, P. 169–177.

5. Ponomarev V. I. and Y.I. Zuenko (1995) Ventilation on the Japan Sea by slope convection. PICES Workshop on the Okhotsk Sea and Adjacent Areas. Abstracts, June, 19-24, 1995, Vladivostok, Russia, p. 81-82.

6. Zuenko Y. I. Promyslovaya okeanographiya Yaposnkogo morya. Vladivosto: TINRO-center, 2008. 227 p.

7. Zuenko Y.I. Year-to-year changes of dense bottom water spreading in Peter the Great Bay shelf (the Japan Sea) and possibility of cascading. In: Oceanic fronts and related phenomena - Konstantin Fedorov Memorial Symposium, 18-22 May 1998, St.-Petersburg, Pushkin, Russia. 1998. IOC Workshop Rep. 2000. 159. P. 631-635.

8. Lobanov V.B., Salyuk A.N., Tishchenko G.Y. et al., Kompleksnaya yaponomorskaya ekspeditsiya. Otchet o rabotakh v 32 reise NIS "Pael Gordienko" s 14 po 23 April, 1999. Vladivostok: TOI DVO RAN, 1999, 173 p.

9. Lobanov V., Salyuk A., Ponomarev V., Talley L., Kim K., Kim K-R, Tishchenko P., Nedashkovskiy A., Kim G., Sagalaev S. Renewal of bottom water in the Japan/East sea. Proc. 17th Int. Symp. Okhotsk Sea & Sea Ice, 24-28 Feb., Mombetsu Japan. Japan: OSCORA, 2002. P. 31-36.

10. Kim K.-R., G. Kim, K. Kim, V. Lobanov, V. Ponomarev, and A. Salyuk. (2002). A sudden bottom-water formation during the severe winter 2000–2001: The case of the East/Japan Sea. Geophysical Research Letters, 29(8)

11. Talley L.D., Lobanov V.B., Ponomarev V.I., et al. Deep convection and brine rejection in the Japan Sea. Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. N. 4. P. 1-4.

12. Senjyu T., T. Aramaki, S. Otosaka, O. Togawa, M. Danchenkov, E. Karasev, and Yu. Volkov (2002). Renewal of the bottom water after the winter 2000-2001 may spin-up the thermohaline circulation in the Japan Sea. Geophysical Research Letters 29(7): 53(1-4).

13. Tsunogai S., Kawada K., Watanabe S., Aramaki T. CFC indicating renewal of the Japan Sea deep water in winter 2000-2001. J. Oceanography, 2003. V. 59. P.685-693.

14. Lobanov V., Ponomarev V., Salyuk A., Sergeev A., Tishchenko P., Kaplunenko D., Sagalaev S., Voronin A. (2012). Variability of the Japan/East Sea bottom water. Proc. Int. Workshop on Marginal Seas in Change: the East Sea and the Mediterranean Sea, November 6-8, 2012, SNU, Seoul, Korea. 49-58.

15. Tanaka K. Formation of bottom water and its variability in the northwestern part of the Sea of Japan// J. Geophys. Res. Oceans, 2014, 119, 2081-2094.

16. Lobanov V.B., Sergeev A.F., Navrotskiy V.V., Voronin A.A., Gorin I.I., Pavlova E.P. Instrumentalnye nablyudeniya kaskadings na sklone zaliva Petra Velikogo Yaponskogo moria. Trudy konferentsii "Sovremennie metody I sredstva okeanologicheskikh issledovaniy (MSOI-2019)". V. 1, Moscow: IO RAS, 2019. P. 104-108.

17. Navrotskiy V.V., Lobanov V.B., Sergeev A.F., Voronin A.A., Gorin I.I., Pavlova E.P. Dinamicheskaya struktura kaskadinga v zalive Petra Velikogo (Yaponskoe More). Okeanologicheskie Issledovaniya. 2020, V. 48, No. 3, pp. 148-163.

18. Karnaukh V.N. Relief dna zapadnoi chasti Yaponskogo morya. Geomorfologiya. 2011, No.2, pp. 78-84

19. Ostrovskii A., Lobanov V., Sergeev A., Park J., Park Y. Moored profiler observations of submesoscale cold-core eddies in Peter the Great Bay of the East/Japan Sea in late winter. Upavlenie riskami v pribrezhnoi zone v usloviyah menyayushchegosya mira. 22-27.08.2016. Academus Publishing . 2017. P. 1-1.

20. Fayman P., Ostrovskii A., Lobanov V., Park J.-H., Park Y.-G., Sergeev A. Submesoscale eddies in Peter the Great Bay of the Japan/East Sea in winter. Ocean Dynamics (2019) 69: 443-462.

21. Lastovetskiy E.I., Veshcheva V.M. Gidrometeorologichesliy ocherk Amurskogo I Ussuriyskogo zalivov. Pod redaktsiey L.N. Zaokopnoy. Primorskoe upravlenie gidrometeorologicheskoi sluzhbi, Vladivostok, 1964, 264 p.

22. Supranovich T.I., Yakunin L.P. Gidrologiya zaliva Petra Velikogo. Trudy DVNIGMI. 1976. No. 22, 199 p.

23. Danchenkov M.A., Feldman K.L., Fayman P.A. Temperatura i solenost vod zaliva Petra Velikogo. Tematicheskiy vypusk DVNIGMI, No. 4, Vladivvostok, Dalnauka, 2003, p.10-25.

24. Rostov I.D., et al. Zaliv Petra Velikogo. Fiziko-geograficheskie, gidrologicheskie charakteristiki i fidrometeorologichesakie usloviya. Vladivostok, 2005, http://www.pacificinfo.ru/data/cdrom/ 3 html/1 00.htm

25. Grigoriev R.V., Zuenko Yu. I. Srednemnogoletnee raspredelenie temperatury vody I solenosti v Amurskom zalive Yaponskogo moria. Izv. TINRO, 2005. V. 143. pp. 179-188.

26. Luchin V.A., Tikhomirova E.A., Kruts A.A. Okeanograficheskiy rezhim vod zaliva Petra Valikogo (Yaponskoe more). Izv. TINRO, 2005. V. 140. pp. 130-169.

27. Luchin V.A., Sagalaev S.G. Okeanologicheskie usloviya v Amurskom zalive (Yaponskoe more) zimoy 2005. Izv. TINRO, 2005. V. 143. pp. 203-218.

28. Luchin V.A., Tikhomirova E.A. Tipovie raspredeleniya okeanograficheskih parametrov v zalive Petra Valikogo (Yaponskoe more). Izv. TINRO, 2012. V. 169. pp. 134-146.

29. Yurasov G.I., Vanin N.S., Rudykh N.I. Osobennosti gidrologicheskogo rezhima zaliva Petra Velikogo v zimniy period. Izv. TINRO, 2007. V. 148. pp. 211-220.

30. Lobanov V.B., Sergeev A.F., Tishchenko P.Ya., Gulenko T.A. et al. Kharakteristiki vod zaliva Petra Velikog v zimniy period. Trudy Regionalnoy nauchnoy konferentsii Okeanografiya zaliva Petra Velikogo, 2-3.04.2012, Vladivostok, DVNIGMI, 2012, pp. 37-45.

31. Lobanov V., A. Sergeev, I. Gorin, P. Shcherbinin, A. Voronin, D. Kaplunenko, O. Popov and T. Gulenko. Observations of dense water cascading along the Peter the Great Bay slope in the northwestern Japan Sea // Int. Conf. Fluxes and Structures in Fluids, Selected Papers. Eds. Yu.D. Chashechkin, V.G.Baydulov, M: MAKS Press, 2014. P. 142-150.

32. Lazaryuk A.Yu., LObanov V.B., Ponomarev V.I. Evolyutsiya termohalinnoy struktury vod Amurskogo zaliva v kholodniy sezon. Vestnik DVO RAN. 2013. No.6. P.59-70.

33. Burov B.A., Lazaryuk A.Yu., Lobanov V.B. Issledovanie teplovogo potoka na granites voda-donnie osadki v Fmurskom zalive Yaponskgo morya v zimniy period. Okeanologiya. 2014, V.54, No.6, pp. 744-753.



About the authors

LOBANOV Vyacheslav B., Ph.D., head of laboratory

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

Address: 43, Baltiyskaya st., Vladivostok, 690041, Russia

Research interests: oceanography, climate, ocean observations, remote sensing

Phone: +7(423) 231-1400. Fax: +7(423) 231-2573

E-mail: lobanov@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0001-9104-5578

SERGEEV Alexander F., senior researcher

- Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
- Address: 43, Baltiyskaya st., Vladivostok, 690041, Russia

Research interests: oceanography, radioisotopes, ocean observations

Phone: +7(423) 231-1400. **Fax:** +7(423) 231-2573 **E-mail:** sergeev@poi.dvo.ru

GORIN Igor I., leading electronic engineer

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

Address: 43, Baltiyskaya st., Vladivostok, 690041, Russia Research interests: oceanography, ocean observations Phone: +7(423) 231-1400. Fax: +7(423) 231-2573 E-mail: gorin@poi.dvo.ru

SHCHERBININ Pavel E., leading software engineer

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

Address: 43, Baltiyskaya st., Vladivostok, 690041, Russia Research interests: computer programming, ocean observations Phone: +7(423) 231-1400. Fax: +7(423) 231-2573 E-mail: p shch@poi.dvo.ru

SEMKIN Pavel Yu., Ph.D., head of laboratory

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

Address: 43, Baltiyskaya st., Vladivostok, 690041, Russia

Research interests: oceanography, climate, ocean observations, remote sensing

Phone: +7(423) 231-1400. **Fax:** +7(423) 231-2573

E-mail: pahno@poi.dvo.ru

Recommended citation:

Lobanov V.B., Sergeev A.F., Gorin I.I., Shcherbinin P.E., Semkin P.YU. EXPERIMENTAL STUDY OF CASCADING ON THE CONTINENTAL SLOPE IN PETER THE GREAT BAY. Underwater investigations and robotics. 2023. No. 3 (45). P. 56–72. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_45_03_06. EDN: BDSIHQ.