

ПРИЛИВНОЙ АПВЕЛЛИНГ НА ЮГО-ЗАПАДНОМ ШЕЛЬФЕ ОСТРОВА САХАЛИН

Г. В. Шевченко^{1,2}, В. Е. Марыжихин¹

¹Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института
рыбного хозяйства и океанографии,
Россия, 693023, г. Южно-Сахалинск, ул. Комсомольская, 196,
e-mail: Shevchenko_zhora@mail.ru

²Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения
Российской академии наук,
Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1б,
e-mail: jonyr.27@mail.ru

Рассмотрены материалы инструментальных измерений скорости течений и температуры воды на горизонтах 100 и 10 м вблизи континентального склона у юго-западного берега о. Сахалин (к югу от о. Монерон). На глубине 100 м выявлены суточные колебания температуры воды с амплитудой 0.5–1 °С, зависящие от интенсивности приливных течений (понижения температуры при ориентации потока на юго-восток, в сторону пролива Лаперуза), интерпретируемые как приливной апвеллинг. Вертикальные распределения температуры воды, хлорофилла «а» и биогенных элементов по данным измерений 15 апреля 1999 г. на океанологическом разрезе Т1 подтверждают гипотезу о приливном перемешивании.

Ключевые слова: приливной апвеллинг, приливные течения, континентальный склон, шельф, температура воды, хлорофилл «а», аммонийный азот, юго-западный Сахалин

Введение

Явление прибрежного апвеллинга представляет значительный интерес в связи с тем, что в результате подъема богатых биогенными веществами глубинных вод существенно возрастает продуктивность в районах, где он наблюдается (Духова, Сапожников, 2014). Наиболее хорошо изучены механизмы формирования ветрового апвеллинга в исследованиях (Hill, Johnson, 1974; Heaps, 1980; Janowitz, Pietrafesa, 1980). В работе (Hill, Johnson, 1974) в частности показано, что у кромки шельфа из-за резкого изменения наклона дна (более резкого на материковом склоне и более плавного на шельфе) возникает отдельный вертикальный поток, направленный к поверхности. Это обстоятельство имеет существенное значение для процессов, рассматриваемых в настоящей работе. Наибольшее значение имеет апвеллинг, формирующийся в результате продолжительного действия сгонных ветров сезонного характера, что типично для районов с муссонным климатом.

Например, для острова Сахалин благоприятные условия для возникновения апвеллинга наблюдаются у его восточного побережья летом, когда преобладают ветра южного румба (Власова и др., 2008; Рутенко и др., 2009; Шевченко, Кириллов, 2017). Осенью, когда устанавливаются сильные и устойчивые ветра северо-западного и северного румбов, в этом районе наблюдается заглупление поверхностной воды (даунвеллинг), а у западного берега формируется апвеллинг (Шевченко и др., 2011), летом в этом районе он проявляется эпизодически (Шевченко, Кириллов, 2017). Авторы обзора (Бондаренко и др., 2012) считают, что апвеллинг и даунвеллинг постоянно сменяют друг друга и их следует рассматривать как единое явление. Еще в большей мере, чем к вертикальному перемешиванию под действием ветра, это утверждение относится к приливному апвеллингу, так как при смене фазы прилива через 6 или 12 часов, подъем воды сменяется обратным процессом (не случайно в иностранной литературе более популярен термин *tidal mixing* – «приливное перемешивание»). Обычно подъем глубинной воды наблюдается при натекании интенсивного приливного потока на подводные горы или острова, одним из первых описал этот механизм русский адмирал С. О. Макаров, обративший внимание на очень быстрое понижение температуры в районе скалы Камень Опасности в проливе Лаперуза (Макаров, 1950) (аналогичное явление отмечено на банке Кашеварова, в районе Ямских островов, на входе в залив Шелихова и т.д.).

Есть также ряд работ, посвященных приливному перемешиванию в заливах (Lee et al., 1997), большой интерес в этом смысле представляет проникновение холодной воды на фазе прилива в эстуарии крупных рек (Osadchiv et al., 2020). Менее изучен приливной апвеллинг в районе кромки шельфа, который также может наблюдаться при крутых материковых склонах и интенсивных приливных течениях, механизм его формирования в таких случаях сходен с наблюдаемым в районе подводных гор.

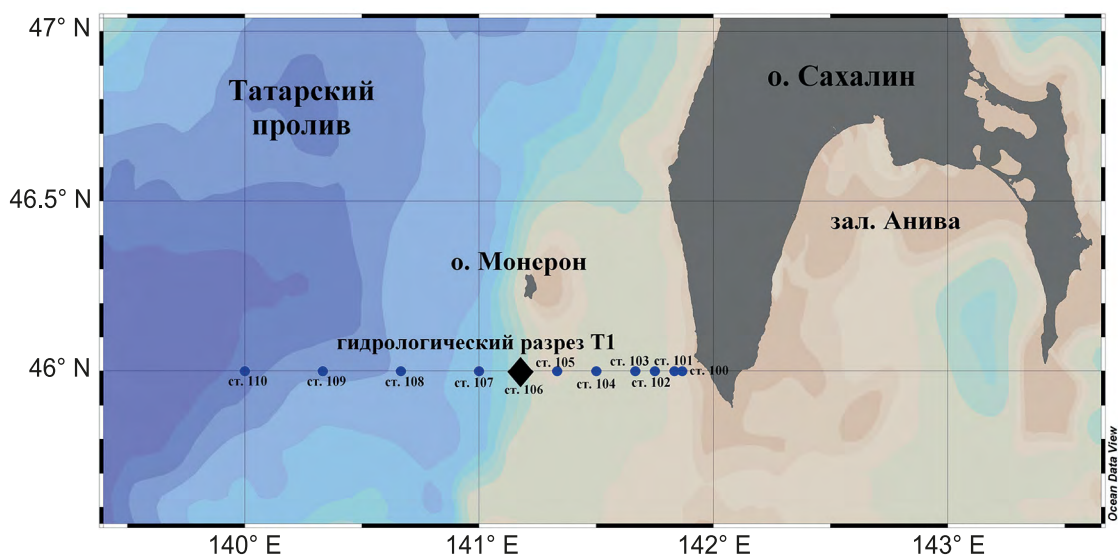


Рис. 1 – Схема гидрологического разреза Т1.

● – гидрологическая станция, ◆ – место поставки АБС

Предметом данной работы является изучение приливного апвеллинга в районе резко выраженной кромки юго-западного шельфа о. Сахалин, к югу от о. Монерон. Материалами для данного исследования послужили инструментальные измерения температуры морской воды и скорости морских течений, выполненные в августе–октябре 1996 г. в поверхностном и придонном слоях, а также результаты гидрологических и гидрохимических исследований на стандартном разрезе T1, на котором и была установлена указанная автономная буйковая станция (АБС на рисунке 1).

Район проведения исследований в юго-восточной части Татарского пролива характеризуется значительной пространственной изменчивостью приливов и отливов и связанных с ними достаточно интенсивных приливных течений (Гидрология..., 2003; Кантакров и др., 2002; Юрасов, Яричин, 1991), что также является важным фактором для приливного перемешивания. Исследуемый район также важен в рыбопромысловом отношении: здесь ведется промысел трески, бычков, мойвы, в последние годы возобновился промысел минтая. Данное обстоятельство является весомой причиной для тщательного изучения юго-западного шельфа о-ва Сахалин.

Материалы наблюдений

В 1995–1997 гг. Сахалинским филиалом ВНИРО (в то время СахНИРО) проводилось исследование кормовой базы рыб и условий окружающей среды в районе пролива Лаперуза и прилежащих водах Японского и Охотского морей (включая шельф у юго-западного побережья о. Сахалин) в рамках совместного российско-японского проекта «Пролив Лаперуза». Программа работ включала повторные океанологические съемки на стандартизированной сети разрезов (в некоторых экспедициях осуществлялся отбор проб воды на гидрохимические определения (Пропп, Гаврина, 2019)), а также постановку измерителей скорости и направления течений (Kantakov, Shevchenko, 1999; Кантакров и др., 2002). В последние годы объем гидрологических исследований в данном районе значительно сократился, поэтому существенное внимание уделяется анализу материалов, полученных в период проведения масштабных экспедиционных исследований.

В данной работе рассмотрены результаты гидрохимических и гидрофизических исследований, полученные в 1995–2001 гг. на стандартном океанологическом разрезе T1 с помощью зонда ICTD#1356 (FSI) с батометрической секцией ROSSETTE, снабженной кассетой из 12 пластиковых батометров Нискина объемом 1.8 л. Гидрохимические исследования были выполнены в 11 случаях из 26 океанологических съемок на данном разрезе, главным образом в 1996 г. (в 4-х экспедициях) и в 1999 г. (в 3-х экспедициях).

Отбор проб на гидрохимические определения осуществлялся через станцию (точнее, на четырех станциях из десяти: T103, T105, T107 и T109) на горизонтах 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 и 500 м. Также проанализированы ряды скорости и направления течений и температуры морской воды, полученные при помощи

автономной буйковой станции (АБС), установленной в районе станции Т106 данного разреза, вблизи резкого континентального склона (рисунок 1). АБС включала два измерителя течений AANDERAA RCM7, расположенных на горизонтах 10 и 100 м и имевших встроенные датчики температуры. Станция была установлена 2 августа и поднята на борт научно-исследовательского судна «Дмитрий Песков» 16 октября 1996 г., приборы были запрограммированы на работу с дискретностью считываний 30 минут, длина полученных временных рядов составила 3613 отсчетов. Полученные материалы гидрологических и гидрохимических съемок (методика анализа проб воды описана в (Пропп, Гаврина, 2019)) обрабатывались при помощи специализированного комплекса программ OceanDataView, данные наблюдений за температурой и скоростью течений – с использованием стандартных методов статистического анализа, расчет параметров приливных течений осуществлялся методом наименьших квадратов (Godin, 1972).

Вариации температуры воды под действием приливных течений

По данным инструментальных измерений, полученным с АБС в 1996 г., были выявлены значительные суточные колебания температуры воды на горизонте 100 м, изменявшиеся во времени с закономерностью, типичной для суточных приливов (выраженная двухнедельная цикличность, обусловленная изменениями склонения Луны в течение тропического месяца), и характеризовавшиеся высокой степенью корреляции с приливными течениями (рисунок 2). Величина этих колебаний существенно менялась от близких к нулю значений при экваториальном приливе до 1.8–2.1 °С при тропических приливах. Для такой глубины вариации температуры около 2 °С являются весьма значительной величиной, они оказывают существенное влияние на обитающую в районе кромки шельфа морскую биоту, поэтому выявление их физической причины представляет существенный интерес.

В поверхностном слое не было отмечено подобных вариаций с характерной для приливов изменчивостью величины, только в моменты усиления колебаний температуры воды вблизи дна наблюдались ее резкие понижения на горизонте 10 м, достигавшие 6–8 °С на протяжении нескольких часов. Наиболее выраженная ситуация с резкими скачками температуры наблюдалась на протяжении 8 суток (с 22 по 29 августа), далее отмечался стабильный суточный ход без резких скачков. С 18 по 23 сентября замечена очередная серия скачков температуры на горизонте 10 м и усиление вариаций на глубине 100 м. Так, скачок температуры 20 сентября на верхнем измерителе составил около 6.4 °С и 1.4 °С на нижнем. Как видно из графика, вначале происходит понижение температуры воды на горизонте 100 м, а потом на горизонте 10 м, когда на нижнем датчике значения параметра уже возрастают (сдвиг по времени между минимумами – около 7–8 часов, в зависимости от скорости течения). Это дает нам основания говорить о подъеме холодной воды с глубины при взаимодействии приливного потока с резко выраженным континентальным склоном.

Поскольку расстояние между приборами составляет около 90 м, соответственно скорость подъема колеблется в пределах 11–13 м/час. Еще примерно час нужен, чтобы от измерителя холодная вода поднялась на поверхность моря, но этого может и не произойти, так как уже начинается движение приливного потока в направлении открытого моря. Между горизонтами 100 и 10 м подъем глубинной воды происходит уже без непосредственного взаимодействия с континентальным склоном. Вероятно, в данной ситуации срабатывает такой же механизм формирования вертикального потока над кромкой шельфа, который описан в работе (Hill, Johnson, 1974) для ветрового апвеллинга.

Отметим, что при достаточно сильных течениях 4–11 сентября, лишь немного менее интенсивных, чем рассмотренные выше – 22–29 августа и 18–23 сентября, вследствие месячных (параллактических) неравенств приливов, холодная вода не достигала прибора, расположенного на горизонте 10 м.

Еще раз подчеркнем, что понижения температуры в поверхностном слое отмечаются не так часто, только при сильных течениях (скорость более 20 см/с), ориентированных на восток, в сторону берега (на рисунке приведена только зональная компонента течения, вопрос о точной ориентации приливного потока обсуждается ниже). Это исключает возможное влияние охотоморской воды, которая на фазе прилива поступает на юго-западный шельф о. Сахалин из пролива Лаперуза и может достигать разреза Т1, хотя и проявляется она преимущественно вблизи берега (Шевченко и др., 2018).

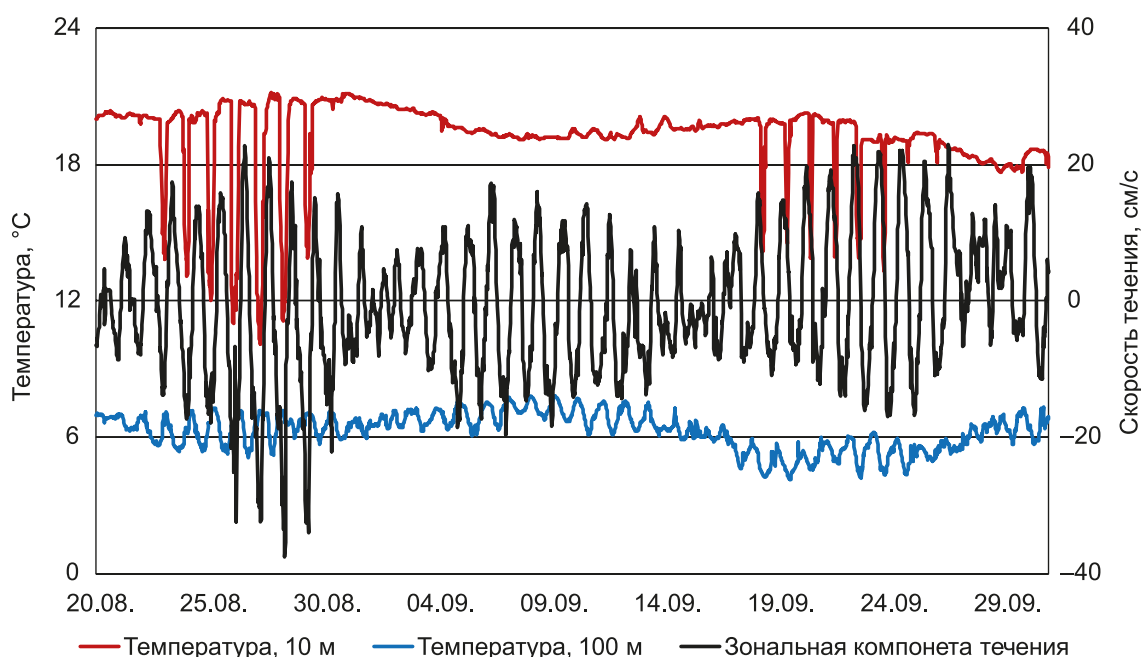


Рис. 2 – Вариации температуры морской воды на глубине 10 и 100 м (красная и синяя линии) и зональной компоненты течения на глубине 100 м (черная)

Наиболее вероятной причиной наблюдаемого явления выступает подъем вод с глубины при взаимодействии приливной волны с резко выраженным континентальным склоном, подобно тому, как это происходит вблизи островов или на подводных возвышенностях (банка Кашеварова, Ямские острова, скала Камень Опасности и т.д.).

Рассмотрим характеристики приливных течений более детально. На рисунке 3 представлены эллипсы главных суточных O_1 и K_1 и полусуточных M_2 и S_2 волн, построенные по вычисленным методом наименьших квадратов значениям амплитуд и фаз указанных составляющих (расчет производился для проекций измеренных векторов скорости течения на параллель и на меридиан по отдельности). Суточные течения намного больше полусуточных – большие полуоси их эллипсов составляют около 17 см/с для O_1 и 20 см/с для K_1 , в то время как для M_2 – 2.8 см/с, а для S_2 – 1.2 см/с. Такое соотношение весьма необычно, вероятно, оно обусловлено характером приливных течений в проливе Лаперуза (где преобладают суточные составляющие (Шевченко и др., 2005)), которые определяют их особенности на юго-западном шельфе Сахалина и в расположенной на сравнительно небольшом удалении точке проведения измерений в частности.

Эллипсы суточных гармоник имеют умеренную степень сжатия – их малые полуоси составляют около 10 и 11 см/с соответственно, примерно такая же она и для полусуточной волны S_2 , в то время как на частоте M_2 течения реверсивны.

Таким образом, основная ось приливного потока имеет направление, близкое к север–северо-западному – юг–юго-восточному, что, вероятно, обусловлено ориентацией береговой линии о. Сахалин в районе проведения измерений. Отметим, что континентальный склон к югу от о. Монерон имеет меридиональную вытянутость и даже развернут немного на юг–юго-запад, так что он имеет определенный угол с основной осью приливного потока. Обход вектора в приливном цикле для суточных волн по часовой стрелке, следовательно, приливное течение сначала ориентировано на восток, в сторону берега, и достигает максимальных скоростей, когда направлено в сторону пролива Лаперуза.

Особенности приливных течений по результатам инструментальных измерений в точке Т106 детально исследовались ранее в работе (Kantakov, Shevchenko, 1999). Было показано, что на горизонте 10 м приливные течения искажались бароклинными эффектами (при этом значимо проявлялись инерционные течения). Для определения характеристик приливного потока в поверхностном слое использовались данные измерений на горизонте 15 м, полученные в этой же точке в мае–августе 1997 г. Было показано, что эллипсы суточных течений идентичны полученным в придонном слое, но большие полуоси на горизонте 15 м чуть больше, чем на 100 м (23 см у поверхности против 20 см вблизи дна для главной суточной волны K_1). Эллипсы полусуточных гармоник менее устойчивы, в особенности для волны S_2 , что, вероятно, обусловлено влиянием стратификации.

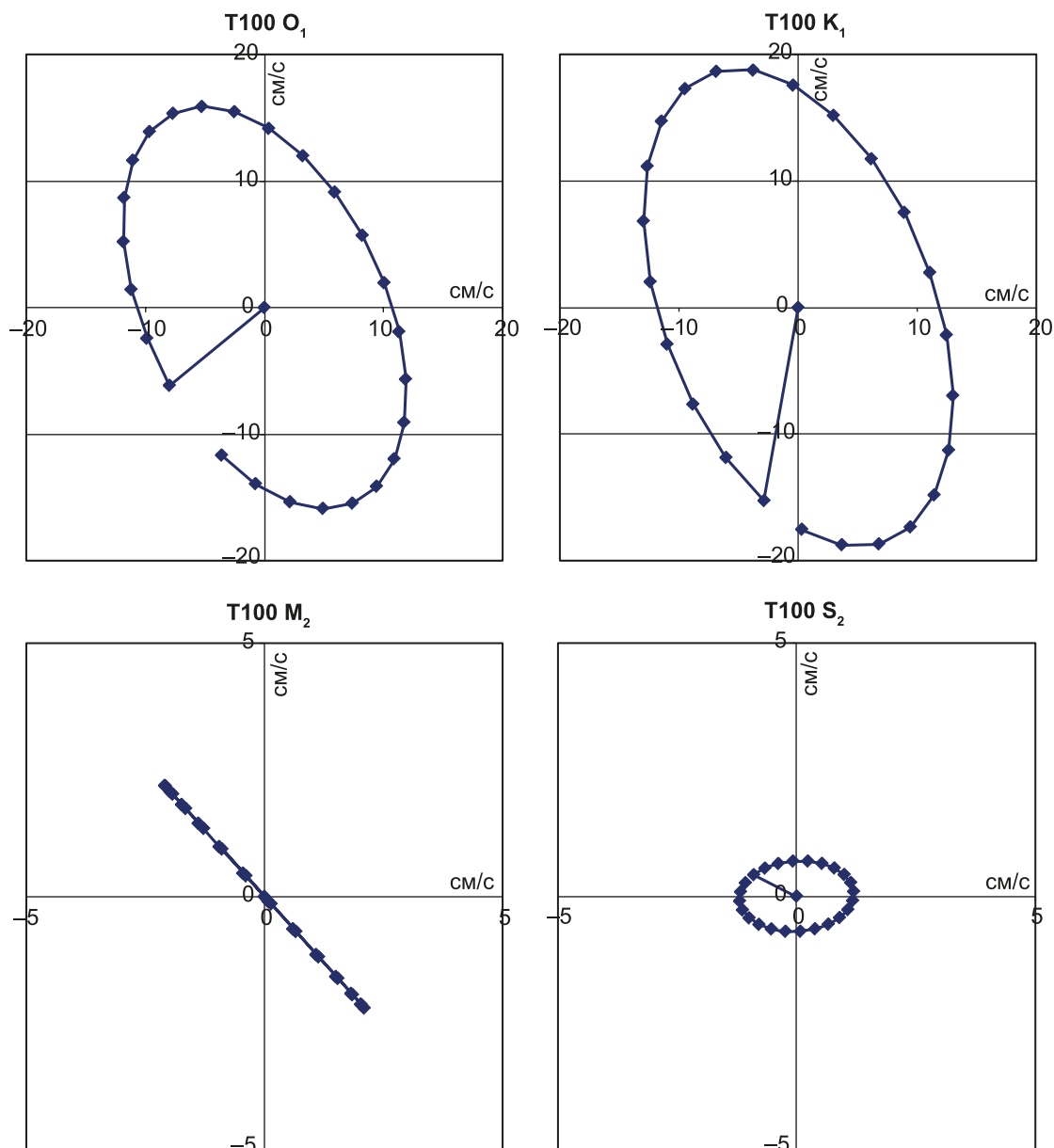


Рис. 3 – Приливные эллипсы главных суточных (O_1 и K_1) и полусуточных (M_2 и S_2) волн на горизонте 100 м

Для определения, при каких направлениях приливного потока наблюдаются понижения, а при каких – повышения температуры морской воды на горизонте 100 м, формировались два ряда величин, в котором одна колонка соответствовала температуре (было вычтено среднее значение), а вторая – направлению приливного течения. Непериодическая компонента течения, обусловленная главным образом влиянием ориентированного на север Цусимского течения и осложняющая понимание происходящих процессов, элиминировалась. По этим рядам рассчитывалась повторяемость значений температуры по градиентам величины и 8 румбам направления течения, как это обычно делается при расчете розы течений, только модуль скорости был заменен другим параметром.

Таблица – Повторяемость (в %) значений температуры воды на глубине 100 м по градациям величины и 8 румбам направления приливного течения

T, °C	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
0.45	8.75	0.42	0	0	0	0	0	4.58
0.35	5.83	2.5	0.42	0	0	0	0	7.08
0.25	2.5	2.92	2.08	0	0	0	3.33	5
0.15	0	0.83	2.5	2.92	0	2.08	2.5	0.42
0.05	0	0	1.25	2.92	2.5	5.83	0.42	0
-0.05	0	0	2.92	1.67	4.17	1.67	0	0
-0.15	0	0	0.42	2.92	0	2.08	0	0
-0.25	0	0	0	5	5.83	0	0	0
-0.35	0	0	0	2.08	1.25	0	0	0
-0.45	0	0	0	2.08	1.25	0	0	0

В таблице приведен пример расчета по отрезку данных продолжительностью 10 суток (20–29 августа), содержащему интенсивные вариации температуры морской воды. Из таблицы четко видно, что понижения температуры наблюдаются при течениях, ориентированных на юг–юго-восток, а повышения – когда поток направлен на север–северо-запад. Таким образом, когда приливное течение ориентировано в сторону пролива Лаперуза, происходит подъем воды, идущей из глубоководной части Татарского пролива на юго-западный шельф о. Сахалин, за счет чего и понижается температура морской воды, что зафиксировано измерителем на станции Т106. Лишь при очень интенсивном приливном потоке возникающий апвеллинг охватывает всю толщу воды, и понижение температуры наблюдается также и в поверхностном слое. Вероятно, по этой причине данное явление не идентифицируется на картах температуры поверхности океана для исследуемого района.

Как отмечалось выше, зоны интенсивного вертикального приливного перемешивания, или приливного апвеллинга, представляют значительный интерес в силу их более высокой биологической продуктивности, обусловленной подъемом биогенных веществ в верхний фотический слой с глубины. С целью определения подобных проявлений обратимся к материалам комплексных гидролого-гидрохимических съемок.

Материалы судовых съемок

В качестве примера рассмотрим результаты комплексной океанологической и гидрохимической съемки, выполненной на разрезе Т1 15 апреля 1999 г. на НИС «Дмитрий Песков». Среди остальных 11 съемок, в которых осуществлялся отбор проб на гидрохимические определения, эта была выполнена в период сравнительно интенсивных приливных течений, ориентированных в сторону берега. Они пришлись на начало усиления приливной компоненты при переходе

от экваториальных приливов к тропическим и имели умеренную величину. Предвычисление приливных течений на основе рассчитанных гармонических постоянных во время измерений на представлявших наибольший интерес станциях T105–T107 позволило оценить скорость потока в 15–17 см/с (ориентация на юго-восток). Поэтому наиболее заметных проявлений апвеллинга можно было ожидать именно в этом случае. Результаты анализа материалов океанологических зондирований и гидрохимических исследований в виде вертикальных распределений температуры воды, концентрации хлорофилла «а» и аммонийного азота представлены на рисунке 4. Как уже отмечалось выше, отбор проб на гидрохимические определения осуществлялся через станцию, поэтому основное внимание мы уделяли станциям 105 и 107, находящимся перед кромкой шельфа и над материковым склоном, поскольку влияние апвеллинга могло проявиться прежде всего на них.

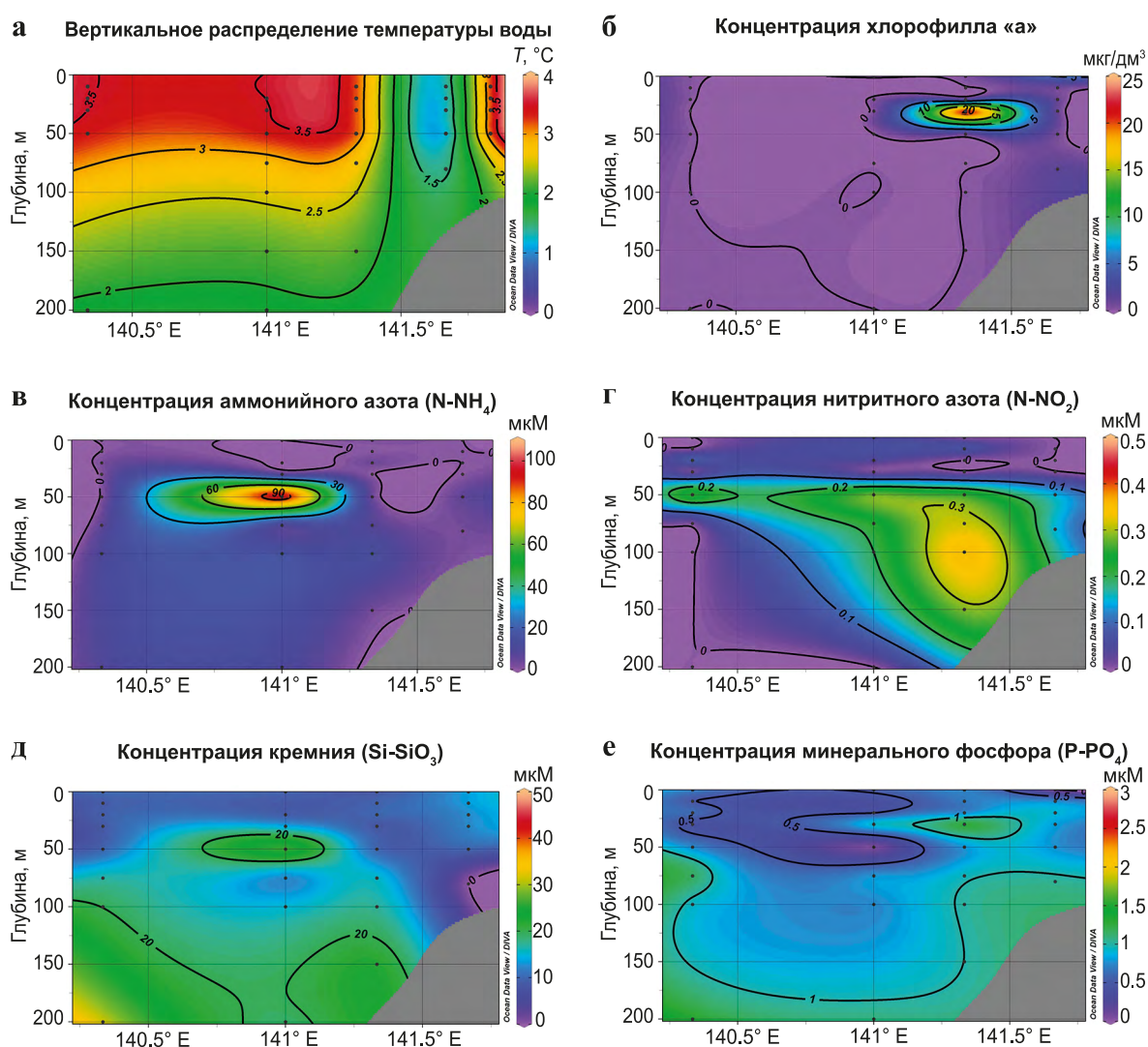


Рис. 4 – Вертикальные распределения температуры воды (а, в °С) и концентраций хлорофилла «а» (б, в мкг/л), аммонийного (в) и нитритного азота (г), кремния (д) и фосфора (е, все в мкМ) на разрезе Т1 по результатам съемки 15 апреля 1999 г.

Почти вертикальный наклон изотерм свидетельствует о подъеме более холодной морской воды (рисунок 4а) вблизи материкового склона, южнее острова Монерон (гидрологические станции Т104–Т106). И в прибрежной зоне, и в мористой части разреза температура воды была выше примерно на 2 °С, что для апреля является существенной величиной. Это согласуется с высказанным выше предположением о реализации механизма, описанного в (Hill, Johnson, 1974) для ветрового апвеллинга. Причем вертикальная струя над кромкой шельфа формируется, а направленная в сторону берега, в отличие от ситуации с воздействием ветра, – нет.

Зона подъема более холодной воды характеризовалась повышенными значениями концентрации хлорофилла «а», максимум которого был расположен на глубине 30 м на станции Т105 (рисунок 4б). Высокое содержание фитопигмента отмечено не непосредственно в области самых низких значений температуры, а в зоне высоких ее градиентов, как ближе к берегу, так и дальше от станции Т106 в направлении открытого моря, хотя сравнивать непосредственно распределения океанологических и гидрохимических параметров сложно из-за того, что, как отмечалось выше, последние определялись не на всех станциях разреза, в частности, не отбирались пробы на станции Т106. Активное цветение микроводорослей по результатам измерений на прибрежной станции Т103 могло сформироваться и под воздействием иных факторов (например, терригенного стока), в то время как значения более 10 мкг/л в районе кромки шельфа при близких к 0 показателях в окружающих водах, с высокой вероятностью связано с влиянием вертикального перемешивания.

Мористее этой области, над континентальным склоном расположена зона с очень высокими концентрациями аммонийного азота $N-NH_4$ (рисунок 4в). Максимальное значение соответствует глубине 50 м и отмечено на станции Т107 – 102 мкМ. Весьма вероятно, что высокие концентрации этого элемента в подповерхностном слое также обусловлены приливным апвеллингом. На этой же станции и той же глубине отмечен менее выраженный максимум в распределении кремния, на станции Т105 на горизонтах 50–100 м – минерального фосфора и нитритного азота (рис. 4г–е). Вероятно, что именно повышенная концентрация фосфора обеспечила локальную вспышку цветения фитопланктона, которая также была зафиксирована на этой станции.

Очевидно, что при умеренных скоростях приливного течения богатая биогенными элементами глубинная вода не могла дойти до поверхности моря, поэтому их повышенные концентрации наблюдались вблизи кромки шельфа и над материковым склоном на глубинах 30–100 м.

Заключение

Подводя итоги выполненного анализа материалов инструментальных измерений скорости течений и температуры морской воды, а также океанологических и гидрохимических исследований на стандартном разрезе Т1, можно констатировать следующее:

В районе кромки юго-западного шельфа о. Сахалин и резко выраженного континентального склона к югу от о. Монерон обнаружено явление приливного апвеллинга. Оно формируется при направлении приливного течения, носящего суточный характер, на юг–юго-восток, в сторону пролива Лаперуза, когда в результате его взаимодействия с континентальным склоном наблюдается подъем холодных вод с глубины, вызывающий колебания температуры с амплитудой 0.5–1 °С на горизонте около 100 м. При наиболее сильных течениях подъем этих вод достигал поверхностного слоя, что вызывало понижения температуры воды на 6–8 °С на глубине около 10 м. Область подъема холодных вод характеризовалась также повышенными концентрациями биогенных элементов и хлорофилла «а» на глубинах 30–50 м. Это подтверждает выдвинутое предположение о существовании приливного апвеллинга на континентальном склоне у юго-западного побережья о. Сахалин.

Скорее всего, это явление существует не только в районе разреза Т1, но и на более протяженном участке резко выраженного континентального склона южнее о. Монерон. Подъем более холодной и богатой биогенами воды на юго-западный шельф о. Сахалин формирует специфические условия обитания морской биоты в данном районе, характер влияния которых еще предстоит изучить.

Благодарности. Авторы благодарят уважаемых рецензентов, чьи рекомендации позволили улучшить текст этой статьи.

Список литературы

1. Бондаренко А. Л., Борисов Е. В., Серых И. В., Суркова Г. В., Филиппов Ю. Г. Закономерности формирования апвеллинга Мирового океана // Метеорология и гидрология. 2012. № 11. С. 75–81.
2. Власова Г. А., Васильев А. С., Шевченко Г. В. Пространственно-временная изменчивость структуры и динамики вод Охотского моря. М.: Наука, 2008. 359 с.
3. Гидрология и гидрохимия морей. Том VIII: Японское море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия. СПб: Гидрометеиздат, 2003. 398 с.
4. Духова Л. А., Сапожников В. В. Гидрохимические показатели первичной продукции в зонах Перуанского и Канарского апвеллингов // Труды ВНИРО. 2014. Т. 152. С. 85–100.
5. Кантаков Г. А., Частиков В. Н., Шевченко Г. В. Современные исследования течений в рыбопромысловых районах Сахалино-Курильского региона // Труды СахНИРО. 2002. № 4. С. 3–21.
6. Макаров С. О. Гидрологические исследования, произведенные в 1895 и 1896 гг. в Лаперузском проливе и других местах... Океанографические работы. М.: Географгиз, 1950. С. 263–275.

7. *Пропп Л. Н., Гаврина Л. Ю.* Сезонные вариации гидролого-гидрохимических параметров и хлорофилла «а» в проливе Лаперуза (Соя) и прилегающих районах Охотского и Японского морей в 1996–1997 гг. // Труды СахНИРО. 2019. № 15. С. 243–279.
8. *Рутенко А. Н., Храпченков Ф. Ф., Соснин В. А.* Прибрежный апвеллинг на шельфе острова Сахалин // Метеорология и гидрология. 2009. № 2. С. 44–53.
9. *Шевченко Г. В., Кантаков Г. А., Частиков В. Н.* Анализ данных инструментальных измерений течений в проливе Лаперуза // Известия ТИНРО. 2005. Т. 140. С. 203–227.
10. *Шевченко Г. В., Вилянская Е. А., Частиков В. Н.* Сезонная изменчивость океанологических условий в северной части Татарского пролива // Метеорология и гидрология. 2011. № 1. С. 78–91.
11. *Шевченко Г. В., Кириллов К. В.* Вариации температуры воды у побережья о. Сахалин по данным инструментальных измерений // Метеорология и гидрология. 2017. № 3. С. 68–78.
12. *Шевченко Г. В., Частиков В. Н., Марыжихин В. Е.* Сезонные вариации морских гидрологических характеристик у юго-западного побережья острова Сахалин // Метеорология и гидрология. 2018. № 12. С. 98–104.
13. *Юрасов Г. И., Яричин В. Г.* Течения Японского моря. Владивосток: ДВО АН СССР, 1991. 176 с.
14. *Godin G.* The analysis of tides. Toronto, Canada: Toronto press, 1972. 264 p.
15. *Heaps N. S.* A mechanism for local upwelling along the European continental slope // Oceanol. Acta. 1980. Vol. 3. No. 4. 449–454.
16. *Hill R. B. and Johnson J. A.* A theory of upwelling over the shelf break // Journal of Physical Oceanography. 1974. Vol. 4. P. 19–26.
17. *Janowitz G. S. and Pietrafesa L. J.* A model and observations of time-dependent upwelling over the mid-shelf and slope // J. Phys. Oceanogr. 1980. Vol. 10. P. 1574–1583.
18. *Kantakov G. A. and Shevchenko G. V.* In situ observations of Tsushima and West-Sakhalin currents near La Perouse (Soya) Strait // PICES Sci. Reports. 1999. No. 12. P. 177–185.
19. *Lee H-J., Chao S-Yu., Fan K-L., Wang Yu-H., and Liang N-K.* Tidally Induced Upwelling in a Semi-Enclosed Basin: Nan Wan Bay // Journal of Oceanography. 1997. Vol. 53. P. 467–480.
20. *Osadchiev A., Medvedev I., Shchuka S., Kulikov M., Spivak E., Pisareva M., and Semiletov I.* Influence of estuarine tidal mixing on structure and spatial scales of large river plumes // Ocean Science. 2020. Vol. 16. P. 781–798.

Статья поступила в редакцию 20.12.2021, одобрена к печати 21.02.2022.

Для цитирования: Шевченко Г. В., Марыжихин В. Е. Приливной апвеллинг на юго-западном шельфе о. Сахалин // Океанологические исследования. М., 2022. Т. 50 (1). С. 11–24. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(1\).2](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(1).2).

TIDAL UPWELLING ON THE SOUTHWESTERN SHELF OF SAKHALIN ISLAND

G. V. Shevchenko^{1,2}, V. E. Maryzhikhin¹

¹*Sakhalin Branch of the All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography,
196, ul. Komsomolskaya, Yuzhno-Sakhalinsk, 693023, Russia,
e-mail: Shevchenko_zhora@mail.ru*

²*Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences, 1b, ul. Nauki, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia,
e-mail: jonyr.27@mail.ru*

The materials of instrumental measurements of the current velocity and water temperature at the horizons of 100 and 10 m near the continental slope of southwestern Sakhalin Island (south of Moneron Island) are considered. At a depth of 100 m, diurnal fluctuations in water temperature with an amplitude of 0.5–1 °C were revealed, depending on the intensity of tidal currents (temperature decrease when the flow is oriented southeast, towards the La Perouse Strait), interpreted as tidal upwelling. The materials of hydrological surveys on the T1 oceanological section have been analyzed, vertical distributions of water temperature, chlorophyll-a and biogenic elements have been constructed based on the measurements on April 15, 1999. They are consistent with the concept of tidal mixing.

Keywords: tidal upwelling, tidal currents, continental slope, shelf water temperature, chlorophyll-a, ammonium nitrogen, southwestern Sakhalin

Acknowledgments: The authors would like to thank the distinguished reviewers whose recommendations made it possible to improve the text of this article.

References

1. Bondarenko, A. L., E. V. Borisov, I. V. Seryh, G. V. Surkova, and Yu. G. Filippov, 2012: Zakonomernosti formirovaniya apvellinga Mirovogo okeana (Regularities of the formation of the upwelling of the World Ocean). *Meteorologiya i gidrologiya*, **11**, 75–81.
2. Duhova, L. A. and V. V. Sapozhnikov, 2014: Gidrohimicheskie pokazateli pervichnoj produkcii v zonah Peruanskogo i Kanarskogo apvellingov (Hydrochemical indicators of primary production in the Peruvian and Canary upwelling zones). *Trudy VNIRO*, **152**, 85–100.
3. *Gidrologiya i gidrohimiya morey*, 2003, Vol. VIII: Yaponskoe more. Vyp. 1: Gidrometeorologicheskie usloviya (Hydrology and hydrochemistry of the seas. Vol. VIII: Japan Sea. Iss. 1: Hydrometeorological conditions). Saint Petersburg, Gidrometeoizdat, 398 p.
4. Godin, G., 1972: *The analysis of tides*. Toronto, Canada: Toronto press, 264 p.
5. Heaps, N. S., 1980: A mechanism for local upwelling along the European continental slope. *Oceanol. Acta*, **3** (4), 449–454.
6. Hill, R. B. and J. A. Johnson, 1974: A theory of upwelling over the shelf break. *Journal of Physical Oceanography*, **4**, 19–26.
7. Janowitz, G. S. and L. J. Pietrafesa, 1980: A model and observations of time-dependent upwelling over the mid-shelf and slope. *J. Phys. Oceanogr.*, **10**, 1574–1583.

8. Kantakov, G. A. and G. V. Shevchenko, 1999: In situ observations of Tsushima and West-Sakhalin currents near La Perouse (Soya) Strait. *PICES Sci. Reports*, **12**, 177–185.
9. Kantakov, G. A., V. N. Chastikov, and G. V. Shevchenko, 2002: Sovremennye issledovaniya techeniy v rybopromyslovykh rajonah Sahalino-Kuril'skogo regiona (Modern research of currents in the fishing areas of the Sakhalin-Kuril region). *Trudy SahNIRO*, **4**, 3–21.
10. Lee, H.-J., S.-Yu. Chao, K.-L. Fan, Yu.-H. Wang, and N.-K. Liang, 1997: Tidally Induced Upwelling in a Semi-Enclosed Basin: Nan Wan Bay. *Journal of Oceanography*, **53**, 467–480.
11. Makarov, S. O., 1950: *Gidrologicheskie issledovaniya, proizvedennye v 1895 i 1896 gg. v Laperuzovom prolive i drugih mestah. Okeanograficheskie raboty (Hydrological research carried out in 1895 and 1896 in the La Perouse Strait and other places. Oceanographic works)*. Moscow, Geografiz, 263–275.
12. Osadchiev, A., I. Medvedev, S. Shchuka, M. Kulikov, E. Spivak, M. Pisareva, and I. Semiletov, 2020: Influence of estuarine tidal mixing on structure and spatial scales of large river plumes. *Ocean Science*, **16**, 781–798.
13. Propp, L. N. and L. Yu. Gavrina, 2019: Sezonnnye variacii gidrologo-gidrohimicheskikh parametrov i hlorofilla-a v prolive Laperuza (Soya) i privileyushchih rajonah Ohotskogo i Yaponskogo morej v 1996–1997 gg. (Seasonal variations of hydrological and hydrochemical parameters and chlorophyll-a in the La Perouse (Soya) Strait and adjacent regions of the Sea of Okhotsk and Japan Sea in 1996–1997). *Trudy SahNIRO*, **15**, 243–279.
14. Rutenko, A. N., F. F. Hrapchenkov, and V. A. Sosnin, 2009: Pribrezhnyj apvellling na shel'fe ostrova Sahalin (Coastal upwelling offshore Sakhalin Island). *Meteorologiya i gidrologiya*, **2**, 44–53.
15. Shevchenko, G. V., G. A. Kantakov, and V. N. Chastikov, 2005: Analiz dannyh instrumental'nyh izmereniy techeniy v prolive Laperuza (Analysis of data from currents instrumental measurements in the La Perouse Strait). *Izvestiya TINRO*, **140**, 203–227.
16. Shevchenko, G. V., E. A. Vilyanskaya, and V. N. Chastikov, 2011: Sezonnaya izmenchivost' okeanologicheskikh usloviy v severnoy chasti Tatarskogo proliva (Seasonal variability of oceanological conditions in the northern part of the Tatar Strait). *Meteorologiya i gidrologiya*, **1**, 78–91.
17. Shevchenko, G. V. and K. V. Kirillov, 2017: Variacii temperatury vody u poberezh'ya o. Sahalin po dannym instrumental'nyh izmereniy (Variations in water temperature off the coast of Sakhalin I. according to instrumental measurements). *Meteorologiya i gidrologiya*, **3**, 68–78.
18. Shevchenko, G. V., V. N. Chastikov, and V. E. Maryzhihin, 2018: Sezonnnye variacii morskikh gidrologicheskikh harakteristik u yugo-zapadnogo poberezh'ya ostrova Sahalin (Seasonal variations in marine hydrological characteristics off the southwestern coast of Sakhalin Island). *Meteorologiya i gidrologiya*, **12**, 98–104.
19. Vlasova, G. A., A. S. Vasil'ev, and G. V. Shevchenko, 2008: *Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' struktury i dinamiki vod Ohotskogo moray (Spatio-temporal variability of the structure and dynamics of the waters of the Sea of Okhotsk)*. Moscow, Nauka, 359 p.
20. Yurasov, G. I. and V. G. Yarichin, 1991: *Techniya Yaponskogo moray (The currents of the Sea of Japan)*. Vladivostok, DVO AN SSSR, 176 p.

Submitted 20.12.2021, accepted 21.02.2022.

For citation: Shevchenko G. V. and V. E. Maryzhikhin, 2022: Tidal upwelling on the southwestern shelf of Sakhalin Island. *Journal of Oceanological Research*, **50** (1), 11–24, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(1\).2](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(1).2).