

УДК 550.34

ВЛИЯНИЕ ПРИДОННЫХ ТЕЧЕНИЙ НА РЕГИСТРАЦИЮ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА МОРСКОМ ДНЕ

© 2022 г. Д. Г. Левченко*

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия***e-mail: levch35@mail.ru*

Поступила в редакцию 30.07.2021 г.

После доработки 18.01.2022 г.

Принята к публикации 28.04.2022 г.

Регистрация сейсмических сигналов на дне акваторий в большинстве случаев сопровождается интенсивными помехами, источниками которых являются придонные течения. До настоящего времени не найдены действенные способы борьбы с этим явлением, существенно затрудняющим развитие морской сейсмологической сети. Основные проблемы состоят в том, что подобные помехи возбуждаются как на элементах оборудования, которые по условиям эксплуатации должны находиться на донной поверхности, так и на неровностях дна. В предлагаемой работе рассматривается ряд механизмов возбуждения таких помех, в том числе, за счет прямого воздействия стационарного и нестационарного потоков на чувствительные элементы донных сейсмографов и вследствие генерации в водной среде сейсмоакустических полей при вихревом и турбулентном течениях. Сравниваются результаты регистрации сейсмических сигналов на дне, в толще осадков и в донной скважине при наличии интенсивных помех от течений. Приводится ряд практических рекомендаций по существенному снижению влияния подобных помех.

Ключевые слова: донные сейсмографы, придонные течения, помехи, механизмы воздействия, физическое моделирование, морские эксперименты, методы уменьшения помех

DOI: 10.31857/S0030157422050112

ВВЕДЕНИЕ

Работа сейсмографов на морском дне существенно отличается от работы на суше. Одной из особенностей является наличие придонных течений и связанных с ними помех. Течения могут действовать на сейсмическую аппаратуру двояким образом: непосредственно раскачивать чувствительные элементы станции, либо возбуждать сейсмоакустические поля в воде и дне, которые затем воздействуют на сейсмоприемники. Размещение чувствительной части сейсмографов в донных скважинах или в толще осадков, как показывает практика, не обеспечивает удовлетворительного решения этой проблемы, поскольку подобные помехи возбуждаются на неровностях дна, а также на элементах оборудования, которые по условиям эксплуатации должны находиться на донной поверхности. К такому оборудованию относятся сменные блоки памяти и питания сейсмографов, специальные такелажные устройства, необходимые для их постановки и подъема. Например, в устье донной скважины размещается большая установочная воронка и др. [15, 21, 24–26].

Частотный диапазон регистрации современных широкополосных сейсмографов составляет

от тысячных долей герца до десятков герц при пороге чувствительности до 10^{-9} м/с [14, 15, 21]. В этом диапазоне распространяются основные виды сейсмических сигналов как от местных, так и от удаленных источников, а также возбуждаются интенсивные помехи от придонных течений. Подобные помехи при регистрации сейсмических сигналов в морских условиях неоднократно описывались в литературе [3, 6, 7, 11, 21, 24–26]. Проводилось также физическое и численное моделирование соответствующих процессов [2, 17, 24, 25, 34]. В результате было установлено, что при скоростях течений от единиц сантиметров в секунду на выступающих частях донных станций появляются вихри, которые возбуждают акустические колебания, воздействующие через воду и дно на сейсмоприемники. Были произведены оценки частотного диапазона подобных помех, однако при оценке их уровня возникали существенные теоретические и практические трудности из-за сложности теории и большого числа влияющих факторов.

Помехи от придонных течений существенно зависят от конструкции донных сейсмографов. Первые разработки подобной аппаратуры содержали поверхностный сигнальный буй, который

через капроновый фал соединялся с балластом и затем, через разделительную цепь — с донным сейсмографом. Помехи от течений при такой конструкции были невелики, однако сама конструкция оказалась ненадежной и сложной при постановке сейсмографа на большие глубины [15, 21].

На смену пришли так называемые “самовсплывающие” сейсмографы, содержащие глубоководный поплавок, балласт и гидроакустический канал связи. Постановка таких сейсмографов производилась в свободном погружении на дно, а подъем — путем свободного всплытия при отсоединении балласта по команде. Блок сейсμοприемников (или весь сейсмограф) лежал на дне, а плавающая часть обычно находилась на расстоянии нескольких метров от дна во избежание ее прилипания к вязкому илу. Такая двухмодульная конструкция получила распространение с начала 80-х годов прошлого века. Было установлено, что влияние помех, возбуждаемых течениями вокруг плавающего модуля, существенно уменьшалось при удалении блока сейсμοприемников. Однако в известных публикациях до последнего времени не были получены оценки требуемого расстояния между модулями, возможно, из-за сложности теории и громоздкости соответствующих экспериментов.

Особого рассмотрения в данной концепции требуют кабельные донные сейсмографы. Конструкции таких сейсмографов мало подвержены помехам от течений вследствие компактности и обтекаемости основного корпуса (обычно длинный цилиндр) и отсутствия вспомогательного оборудования. Помехи в этом случае могут возбуждаться за счет изрезанности рельефа дна. Вследствие значительной стоимости прокладки морских кабелей выбор места постановки кабельных сейсмографов требует особой тщательности с предварительным исследованием полигона с помощью автономных сейсмографов.

С начала 90-х годов прошлого века для постановки донных сейсмографов и их обслуживания в ряде случаев стали использоваться обитаемые и необитаемые подводные аппараты. Это существенно повышало стоимость работ, но позволяло лучше защищать приборы от придонных течений. В одном из экспериментов донный сейсмограф был накрыт стеклянным колпаком [30], в других случаях блок сейсμοприемников, или целиком сейсмограф, заглублялся в донный ил или помещался в донную скважину [32, 33]. Однако эти технологии, значительно усложняя процесс постановки сейсмографов, как будет показано далее, зачастую не давали ожидаемого результата. Это происходило потому, что часть оборудования донных станций, вследствие эксплуатационной необходимости, остается на поверхности дна в

непосредственной близости к блоку сейсμοприемников и служит источником вихревых помех.

Следует отметить, что придонные течения в той или иной степени присутствуют в морских акваториях практически всегда и везде. Однако далеко не во всех публикациях, посвященных регистрации сейсмических сигналов на дне, приводятся сведения о сопутствующих измерениях течений, а также о рельефе дна. Насколько нам известно, в литературе не производились систематизации подобных помех и анализ их специфических особенностей, не предлагались также системные меры борьбы с ними.

В настоящей статье делается попытка обобщить на общефизической основе достаточно разрозненные сведения о возбуждении помех придонными течениями при регистрации широкополосных сейсмических сигналов на дне, в донной скважине и при заглублении блока сейсμοприемников в ил, рассмотреть ряд механизмов, объясняющих происхождение этих помех и предложить определенные методы уменьшения их влияния. В статье используются материалы научных публикаций и собственный опыт автора с учетом 35-ти летней работы с коллективами Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и ОКБ океанической техники РАН в этой области.

ПРИДОННЫЕ ТЕЧЕНИЯ, ИХ ИСТОЧНИКИ И ОСОБЕННОСТИ

Придонные течения в морях и океанах формируются совместным действием многих факторов и отличаются большим разнообразием. Основные возбуждающие силы: вращение Земли, приливы, перепады атмосферного давления, ветер, поверхностные и внутренние гравитационные волны, пространственные вариации плотности и температуры воды, взвешенные осадки [1, 8, 20, 31]. На рис. 1 приведена примерная схема некоторых направлений океанических придонных течений.

Ряд подобных течений формируется как противотечения глобальных водных потоков — Гольфстрима, Восточно-Африканского и т.д., другие совпадают по направлению с течениями Калифорнийским, Куроисио и др. В Южном океане происходит глобальное опускание холодных вод. Для придонных течений характерны многочисленные ответвления от основного потока, связанные с рельефом дна.

Редкие по времени, но важные для сейсмологии придонные течения могут возбуждаться морскими землетрясениями или волнами цунами. На движущуюся водную массу воздействуют рельеф дна, силы трения и силы, связанные с вращением Земли. Вследствие взаимодействия с дном придонные течения стратифицированы по скорости и по плотности. К сожалению, в имею-

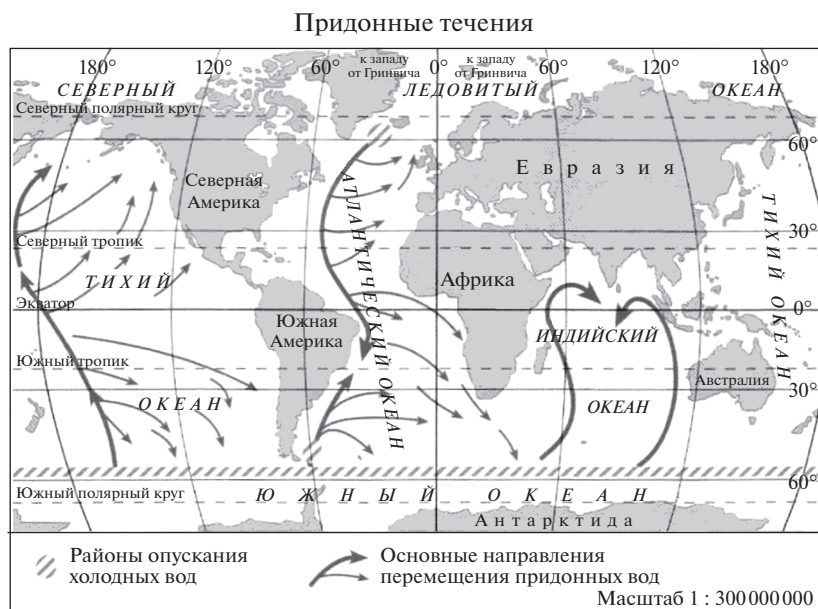


Рис. 1. Примерная схема основных придонных течений (из открытых источников).

шейся справочной литературе содержится недостаточно практических сведений о придонных течениях и их свойствах. Подробные исследования придонных течений проводились лишь в ряде характерных элементов морского рельефа: в некоторых проливах, крупных подводных каньонах, вблизи портов, нефтедобывающих платформ и др. [31].

В табл. 1 приведены основные типы придонных течений, их источники и способы влияния на сейсмографы [1, 6, 9, 17, 24]. В таблице не рассматриваются прибрежные течения, поскольку сейсмографы обычно не размещаются вблизи зоны прибоа. Стационарным считаем течение, характерное время изменения которого значительно больше 1000 секунд, т.е. возможная помеха находится вне частотного диапазона сейсмографа.

Основные особенности придонных течений состоят в уменьшении скорости с приближением ко дну, существенное влияние на направление и скорость оказывает рельеф дна, а также стратификация по плотности из-за переноса взвешенных осадков.

Морские придонные течения могут иметь глубину в десятки или сотни метров, однако в нашем случае интерес представляет только нижняя часть этого слоя толщиной в единицы метров. Обычно в этом слое придонные течения направлены вдоль склонов подводных возвышенностей или вдоль оси подводных долин [1, 8, 10, 32].

На рис. 2 приведены примеры ряда профилей придонных течений. Придонные воды приводятся в движение в основном вышележащими слоями, однако вследствие вязкости воды происходит

Таблица 1. Источники и типы придонных течений и возбуждаемые ими помехи

Источники придонных течений		Типы придонных течений		Особенности помех	
Вращение Земли	⇒		⇒	Вибрации блока сейсмоприемников	
Приливы					
Спутные течения		Ламинарное стационарное			
Противотечения		Ламинарное переменное			
Поверхностные волны				Вихревое стационарное	Возбуждение акустического поля в воде и дне
Внутренние волны				Вихревое переменное	
Ветровые нагоны				Турбулентное	
Разность атмосферного давления					
Разность плотности					

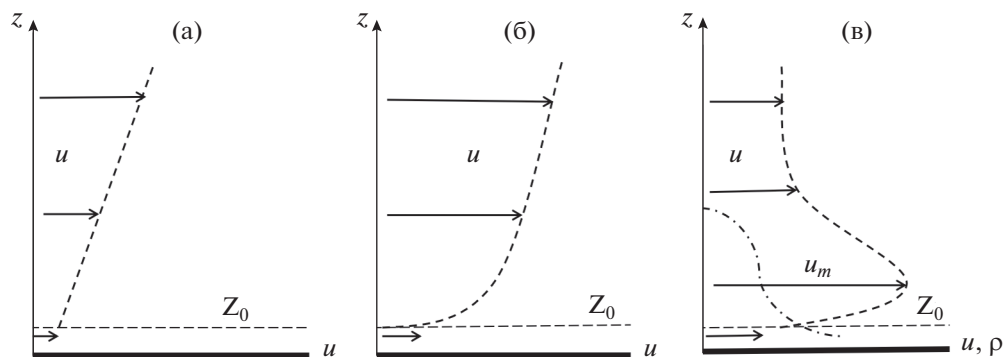


Рис. 2. Характерные профили скорости придонных течений (штрихи): (а) – ламинарное, (б) – турбулентное, (в) – плотностное стратифицированное. Разность плотностей обозначена на (в) штрих-пунктиром. Z_0 – уровень пограничного слоя, u_m – максимальная скорость.

постепенное торможение с приближением ко дну. При малой общей скорости течение носит ламинарный характер, а градиент скорости имеет линейную зависимость с глубиной. При увеличении скорости возникает турбулентное перемешивание между слоями, а профиль скорости получает логарифмическую зависимость. Особый характер имеет стратифицированное плотностное течение (рис. 2в). Здесь движущая сила находится внутри самого потока и зависит от разности плотностей в сечении жидкости. Поэтому максимальная скорость находится примерно в средней части по глубине течения [1, 8, 15, 20].

Непосредственно ко дну прилегает так называемый пограничный слой, толщина которого Z_0 определяется строением и материалом дна и составляет обычно от единиц до десятков сантиметров. Течение в этом слое носит сложный переменный характер и часто сопровождается обильным переносом взвесей. Скорость течений в пограничном слое составляет от единиц до десятков сантиметров в секунду. Такое течение, как показывает практика, может вызывать существенные сейсмоакустические помехи. Полагаем, что аппаратура размещается на относительно ровном участке с вариацией уровня дна значительно меньшим ее вертикальных размеров.

Изменчивость во времени, направлениях и скорости придонных течений определяется возбуждающими их силами и рельефом дна. Например, приливные течения вдали от берегов и при относительно ровном дне вращаются на 360° при каждом цикле прилива. При пульсирующем течении или сложном рельефе могут образовываться вихри различного масштаба, которые будут перемещаться вместе с потоком. Длинные гравитационные волны возбуждают придонные течения в соответствии с собственной частотой [1, 8, 20, 31].

Следует отметить, что достаточно полные исследования придонных течений из-за сложности

проведения длительных глубоководных наблюдений проводятся в основном только в некоторых характерных районах морей и океанов: в крупных проливах, в устьях рек, в некоторых подводных каньонах, в местах прокладки подводных трубопроводов и кабелей и т.д. Поэтому сведений о придонных течениях в сейсмически активных районах морей и океанов имеется обычно немного. Это обстоятельство создает существенные трудности при выборе места постановки сейсмических приборов на дне и предварительной оценки возможного уровня помех. Для этого необходимо знать основные характеристики течений: скорость, направление, их изменчивость, а также структуру потока (ламинарный, вихревой, турбулентный). В связи с этим при планировании длительных морских сейсмологических исследований, кроме тщательного анализа имеющихся общих сведений о придонных течениях и рельефе дна, необходимо проводить длительные натурные измерения их параметров.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЧЕНИЙ С ЭЛЕМЕНТАМИ ДОННЫХ СЕЙСМОСТАНЦИЙ

В связи с уменьшением скорости течений у дна элементы донных станций стараются размещать поближе ко дну, зарывать в ил или опускать в донные скважины. Однако, как показывает практика, эти меры не являются достаточными, поскольку по эксплуатационным требованиям часть оборудования должна размещаться на поверхности дна: сменные блоки питания и памяти, устройства постановки и всплытия и др. Даже на расстоянии 10–20 см от дна скорость течения может составлять единицы сантиметров в секунду, что, согласно приведенным ниже оценкам (табл. 2 и 3), ведет к появлению вихрей и может создавать акустическую помеху [3, 7, 10, 25, 26].

Таблица 2. Обобщенные результаты возбуждения помех водными потоками

Re	0–20	20–200	200–2000	>2000
Течение за телом:	Ламинарное	Вихревое		Турбулентное
Пульсации:	Нет	Стационарные	Нестационарные	
Акустическое поле:	Нет	Нет	Периодическое	Хаотическое

Таблица 3. Числа Рейнольдса и частоты возбуждаемых помех для двух скоростей течений и ряда характерных размеров элементов донных сейсмографов

Скорость течения	Размеры L (м)	1	0.1	0.01
0.06 м/с	Re	33000	3300	330
	f (Гц)	0.012	0.12	1.2
0.3 м/с	Re	166000	16600	1660
	f (Гц)	0.06	0.6	6

Существенное влияние на возбуждение помех от течений может оказывать рельеф дна. На рис. 3 приведены эскизы, показывающие воздействие течений при различном размещении элементов донных сейсмографов, а также влияние неровностей рельефа.

Помехи от придонных течений имеют двоякую природу: непосредственное воздействие на блок сейсмоприемников стационарных или нестационарных течений и возбуждение акустического поля в водной среде и донном массиве. Ламинарный и стационарный в среднем поток может создавать помехи за счет появления и отрыва вихрей или возникновения турбулентного следа непосредственно за элементами донной станции или вследствие неровностей рельефа. Для исследования подобных явлений традиционно использовалась теория течения вязкой жидкости, уравнения Навье–Стокса, соотношения Рейнольдса, Струхалея, Прандтля и др. Большое внимание уделялось физическим экспериментам. В последнее

время в связи с общим развитием вычислительной техники проводится значительный объем численного моделирования в этой области [4, 5, 17, 19, 20, 25, 34].

Для конкретизации анализа элементы донного сейсмографа в первом приближении можно представить в виде совокупности сфер и длинных цилиндров соответствующих размеров. К первым относятся приборные корпуса и некоторые навесные элементы с характерными размерами от 1 до 0.1 м, ко вторым – кабели, трубчатые стойки и др. с диаметром порядка 0.01 м. Крупногабаритные установочные воронки (высота и диаметр до 5 м) в устье донной скважины можно отнести условно к “сферам” [13, 21, 24, 27, 35].

На рис. 4 приведены экспериментально полученные примеры обтекания неподвижного тела (сферы) при разной скорости водного потока, характерные с точки зрения возбуждаемых помех [3]. Для оценки характера течения используются числа Рейнольдса $Re = \frac{uL}{\nu}$, где u – средняя скорость течения (м/с), L – характерный размер тела (м), $\nu = 10^{-4}$ – кинематическая вязкость (m^2/c) воды. Похожие результаты получаются и при обтекании неподвижного цилиндра в плоскости его поперечного сечения [4, 5, 34].

На рис. 4а изображено обтекание неподвижного шара сравнительно медленным течением при числе Рейнольдса $Re = 17.9$. Скорость течения прилегающих к шару слоев больше, чем в потоке, поэтому согласно эффекту Бернулли, за шаром образуется область пониженного давления,

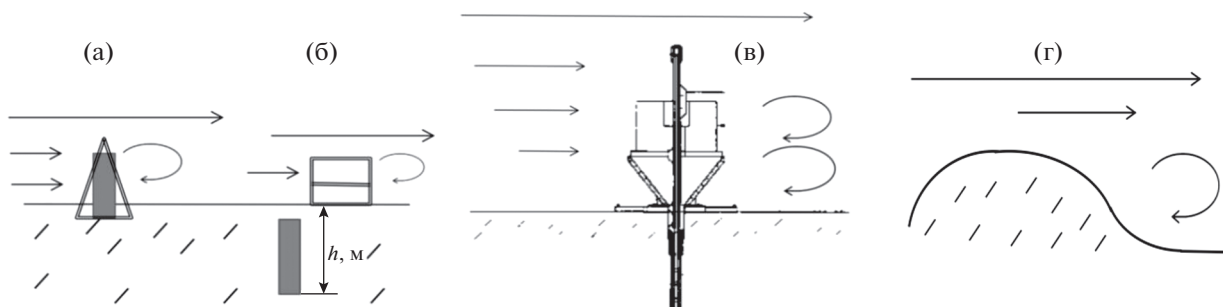


Рис. 3. Взаимодействие придонных течений с элементами донных сейсмографов и рельефом дна. Сейсмограф на дне (а); сейсмограф заглублен в ил, часть оборудования на дне (б); сейсмограф в скважине, установочная воронка и другое оборудование на дне (в); неровности рельефа (г).

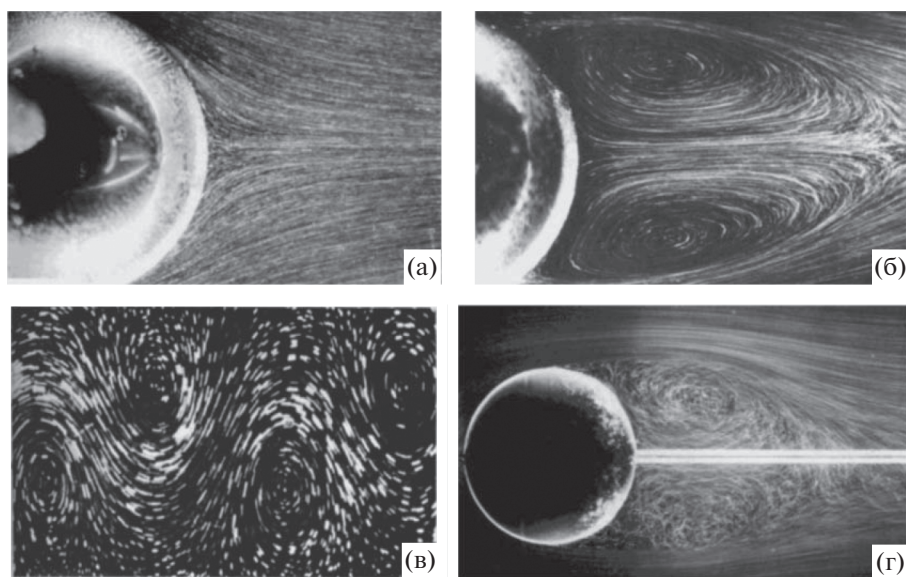


Рис. 4. Обтекание сферы водным потоком: (а) – медленное ламинарное течение, $Re = 17.9$, (б) – среднее по скорости вихревое течение, $Re = 118$, (в) – движущиеся вихри Кармана за сферой при $Re > 200$, (г) – турбулентное течение за сферой, $Re = 15000$.

однако, вследствие малой скорости, поток прилегает к шару по всей поверхности. Отрыв в задней части шара происходит, начиная с $Re = 24$. Акустические поля не возбуждаются.

На рис. 4б изображено обтекание шара потоком при $Re = 118$. За шаром возникают два симметричных вихря, вращающихся в противоположные стороны. За вихрями образуется вторая область пониженного давления, вследствие чего вихри удлиняются. Пропорционально увеличилась и длина участка, прилегающая к поверхности шара и к внешней поверхности вихрей, где скорость слоев жидкости велика, а давление низкое. Течение в общем потоке остается стационарным, ламинарным, акустическое поле не возбуждается.

В результате дальнейшего увеличения скорости потока, примерно начиная с $Re = 200$, симметрия вихрей нарушается – один из вихрей начинает расти за счет другого (рис. 4в). Давление за этим вихрем быстро падает, что приводит к его отрыву от тела и самостоятельному движению в потоке. После этого начинает расти второй вихрь, и процесс повторяется, в результате которого в потоке движется цепочка вихрей (вихри Кармана). Отрыв вихрей сопровождается перепадами давления, возбуждающими вибрацию тела и перемное квазипериодическое акустическое поле в воде. Следует подчеркнуть, что звуковые волны генерируются непосредственно за телом, а не вдоль всей цепочки вихрей Кармана.

При дальнейшем увеличении скорости течения появляется турбулентное перемешивание на границе зоны отрыва, но одновременно продол-

жается образование вихрей. Такой режим называется переходным. При достижении критического числа Рейнольдса (для воды – около $Re = 2000$) начинается случайное перемешивание струй во всей области за телом (рис. 4г). Наступает турбулентный режим обтекания.

В результате нарушается автоколебательный режим и прекращается образование вихрей Кармана. Однако турбулентная область непосредственно за телом продолжает пульсировать и возбуждать акустическое поле, которое носит теперь случайный характер. Область турбулентности непосредственно за телом сильно коррелирована и поэтому является основным источником акустической помехи. С удалением от тела область турбулентности расширяется, корреляция уменьшается, наконец, происходит полная диссипация турбулентности. [4, 5, 12, 16, 17, 22, 29]. В табл. 2 обобщены некоторые характеристики наблюдаемых явлений возбуждения акустических полей водными потоками при различных числах Рейнольдса.

Для оценки частотного диапазона вибрационных и акустических помех от придонных течений, следуя [5, 16, 18, 22], можно воспользоваться слегка измененным соотношением Струхалья $f = Su/L$. Здесь f – частота звука; S – число Струхалья; L – характерный размер тела; u – линейная скорость обтекающего потока. Это соотношение оказывается справедливым для очень широкого диапазона изменения чисел Рейнольдса, несмотря на то, что типы течений при этом могут различаться. Число Струхалья в диапазоне $2 \times 10^2 < Re < 2 \times 10^5$ составляет 0.2 ± 0.02 . При Re меньших 100 число

Струхалия плавно уменьшается до 0.1, соответственно снижается частота помех. При этом обычно снижается и чувствительность сейсмографов к помехам на этих частотах. Числа Рейнольдса выше 2×10^5 не характерны для придонных течений и сейсмических сигналов в нашем случае.

Поскольку характер возбуждения вихрей зависит от размеров препятствий, все элементы донных сейсмографов для удобства оценки можно разделить на три группы с характерными размерами L : прочных корпусов — 1 м, навесного оборудования — 0.1 м, элементов такелажа и кабелей — 0.01 м. Определим по приведенным выше формулам числа Рейнольдса (при характерной температуре 4°C) с учетом этих элементов и соответствующие им средние частоты помех. Результаты приведены в табл. 3.

Следует отметить, если микрорельеф дна сильно расчленен и имеет особенности, близкие по размеру к указанным в табл. 3, то они также могут быть источниками акустических помех в водной среде и дне.

Рассмотрим способы воздействия акустических полей, возбуждаемых придонными течениями, на сейсморегирующую аппаратуру. Следует учитывать, что в рассматриваемом диапазоне частот (около 0.001–10 Гц) длины волн, как в водной среде, так и в донном массиве, много больше размеров источников полей помех и масштабов размещения аппаратуры. Поэтому следует рассматривать только ближнюю зону поля помех. Можно также полагать, что сейсмографы расположены на границе жидкой и упругой сред и регистрируют скорость смещения этой границы для всех рассматриваемых случаев их размещения (рис. 3). Отношение скоростей смещения частиц в жидкой среде $v_{\text{ж}}$ по отношению к частицам на границе дна $v_{\text{гп}}$ для ближней зоны дается выражением

$$v_{\text{ж}}/v_{\text{гп}} = 2(1 + c_1\rho_1/c\rho)^{-1},$$

где c и c_1 — скорости звука в воде и дне, ρ и ρ_1 — плотности соответственно воды и вещества дна [9]. При подстановке характерных значений $c = 1500$ м/с, $c_1 = 3000$ м/с, $\rho = 1000$ кг/м³ и $\rho_1 = 2500$ кг/м³ получаем ослабление скорости смещения частиц на границе и в прилегающем слое дна в 6 раз. Поскольку длина волны в донном массиве составляет более 3000 м, дальнейшее ослабление поля помех на глубине реального размещения сейсмографа в донной скважине получается незначительным.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим ряд примеров экспериментального исследования влияния придонных течений

на работу донных сейсмографов. Один из экспериментов проводился сотрудниками Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН в Средиземном море в районе о. Крит в 1988 г. [10, 11]. Комплексными донными станциями измерялись направление и скорость придонных течений, температура и регистрировались сейсмические сигналы на дне. Другой эксперимент проводился коллективом научных институтов США в заливе Монтерей вблизи Калифорнии в 2002 г. [32]. Изменялись направления и скорости течений и регистрировались сейсмические сигналы. При этом сейсмоприемник заглублялся в слой осадков. Третий эксперимент проводился в Тихом океане возле Гавайских островов научным коллективом институтов США [35]. Использовались для сравнения три сейсмографа: размещенный на дне, в донной скважине и заглубленный в ил. Несмотря на значительные различия в конструкции приборов и способах их постановки, во всех трех экспериментах негативное влияние помех от придонных течений существенно сказывалось на качестве регистрации сейсмических сигналов [30, 33, 35].

Эксперимент в Средиземном море в районе о. Крит

В июле 1988 г. во время 49-го рейса НИС “Академик Курчатов” (Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН) в Средиземном море около о. Крит был проведен специальный эксперимент по определению влияния придонных течений и поверхностных ветровых волн на интенсивность помех при регистрации сейсмических сигналов. Карта полигона приведена на рис. 5. Использовались три донные станции (обозначены А, В и С), которые были поставлены на дно на расстояниях А–С и В–С около 25 км и А–В около 35 км. Дно в месте расположения полигона было сильно изрезано: вершины подводных гор подымались до глубины 100 м и менее, долины опускались до 2500 м. Станции располагались на склонах гор на глубинах соответственно 1780, 1530 и 1745 м. Изрезанность рельефа обусловила существенное различие течений в местах постановки станций [11, 12].

В комплект донных станций входили сейсмографы (аналогового типа), измерители скорости и направления течений и температуры воды, седиментационные ловушки и ряд устройств вспомогательного навигационного оборудования (рис. 6). Частотный диапазон сейсмографов составлял 1–20 Гц, динамический диапазон по двум уровням записи — около 70 дБ. Регистрация велась на 8-ми канальный магнитофон с записью синусоидального пилот-сигнала и кода времени. Использовались измерители течений роторного типа с порогом чувствительности по скорости око-

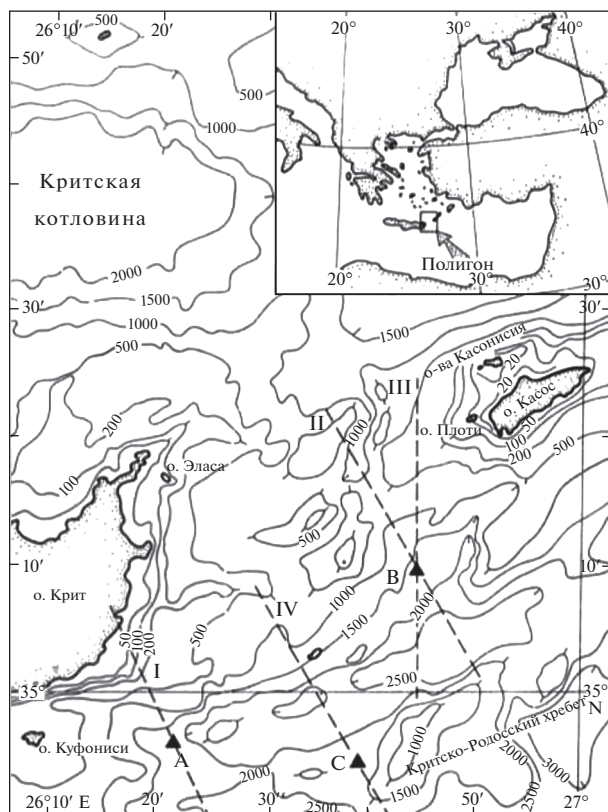


Рис. 5. Карта критского сейсмологического полигона. Треугольниками обозначены места постановки донных сейсмостанций. Пунктирные линии – профили глубин.

до 0.01 м/с, по направлению около 5° , по температуре 0.02° .

Результаты измерений для северной станции (В) скорости и направления придонных течений, направления ветра на поверхности и трех компонент сейсмического сигнала приведены на рис. 7. Пунктиром показана скорость течений, определенная на западной станции (А). На станции С придонные течения не были обнаружены.

Сигналы помех, записанные ОБС, вначале транспонировались в звуковой диапазон частот путем воспроизведения с повышенной скоростью (примерно в 160 раз) по сравнению со скоростью записи. Затем определялся средний спектр мощности для 30-ти минутных интервалов. В результате получались временные вариации спектров мощности помех в течение нескольких суток записи. На рисунке уровни помех приведены в относительных единицах по сравнению с пороговым сигналом 2.5×10^{-8} м/с на частоте 5 Гц. Скорости течений флюктуировали, поэтому усреднялись с интервалом 15 мин [21].

В целом рис. 7 носит качественный характер. Воздействия ветра и течений представлены в век-

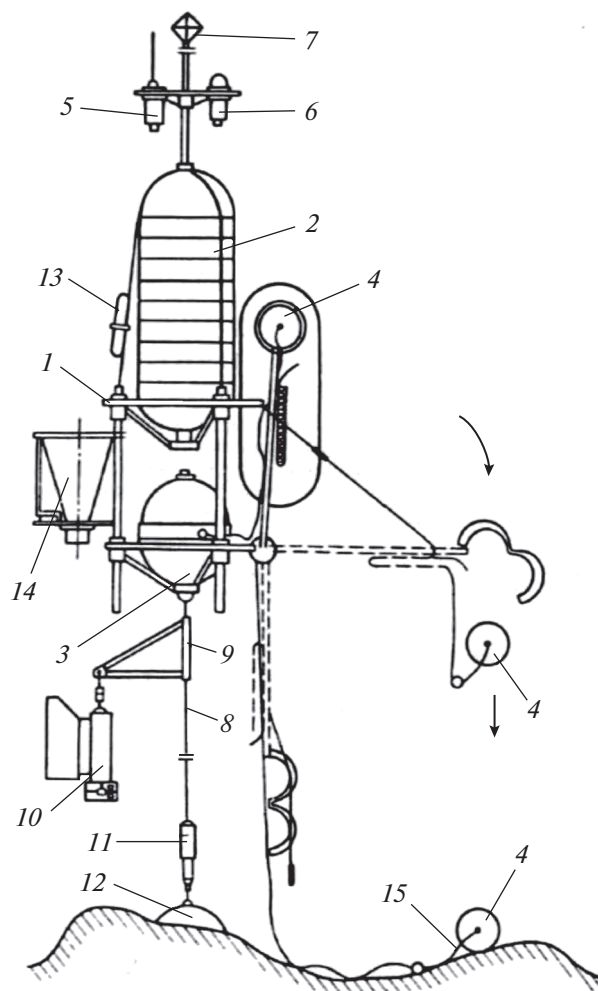


Рис. 6. Донная станция АДС-М разработки ИО РАН (1980-е годы): 1 – несущая рама, 2 – поплавковый модуль из синтактика, 3 – контейнер с регистратором сейсмографа, 4 – блок сейсмоприемников с откидной штангой, 5 – радиомаяк, 6 – проблесковый маяк, 7 – радиолокационный отражатель, 8 – соединительный буйреп, 9 – кронштейн с измерителем течений, 10, 11 – размыкатель балласта, 12, 13 – гидроакустический маяк, 14 – седиментационная ловушка, 15 – кабель-трос.

торной форме. Вертикальная ось указывает вверх на север. Стрелки, как принято, направлены по течению или ветру. Их длина соответствует интенсивности.

В результате эксперимента было установлено, что течение в районе станции В носило квазипериодический характер с периодом около 12 ч и имело длительность по 4–6 ч при основном северо-западном направлении, совпадающем с направлением подводной долины. Максимальная скорость течения составляла от 4 до 6 см/с. Следует заметить, что станции А и С экранировались с северо-запада островом Крит. Течения вызывали интенсивные помехи в сейсмографе станции В,

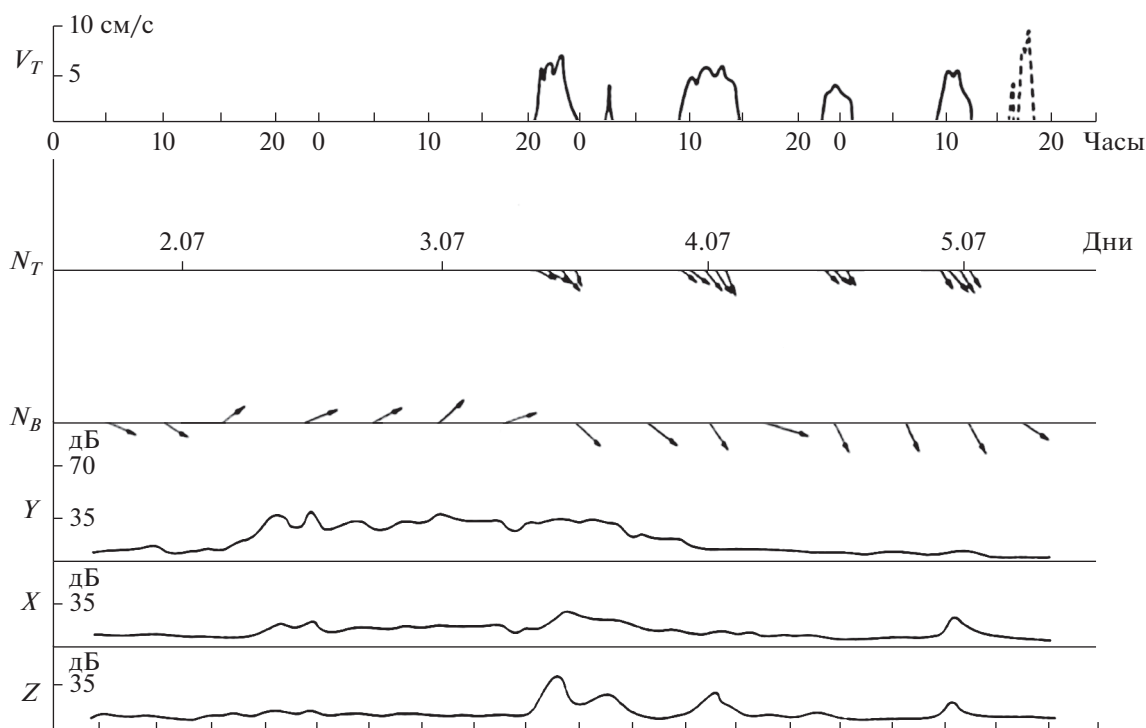


Рис. 7. Результаты донного эксперимента вблизи о. Крит, станция В, глубина постановки 1530 м (1–5 июля 1988 г.). Три верхних графика: V_T – скорость течений, N_T – вектор направления течений, N_B – вектор направления ветра. Три нижних графика: Y , X , Z – интенсивность шумов на горизонтальных и вертикальном каналах сейсмографа.

временами полностью перекрывая чувствительные каналы (до 35 дБ). Частоты помех составляли около 1,3, 3 и 6 Гц и представляли собой квазисинусоиды.

Кроме помех от течений на Y -канале сейсмографа В появлялась помеха, совпадающая по времени с ветром, дувшим в юго-западном направлении с 15 ч 2 июля по 15 ч 3 июля. Ветер развил волнение до 3 баллов и мог вызвать поверхностное течение выше по склону, на котором стояла станция, и создать акустическую помеху.

Изложенные материалы являются примером конструирования и использования донных сейсмографов при практическом отсутствии в то время сведений о влиянии придонных течений, и примером одной из первых попыток выяснения этого вопроса. Важным моментом данного эксперимента является обнаружение участка дна (станция С), свободного от помех, вызванных придонными течениями.

Эксперимент в заливе Монтерей, Калифорния, США

В апреле 2002 г. Сейсмологической лабораторией г. Беркли и Исследовательским институтом Аквариума залива Монтерей был начат эксперимент по долговременной регистрации сейсмиче-

ских сигналов на дне этого залива. С помощью исследовательского судна и подводного робота в подводном каньоне Монтерей на глубине 1000 м была установлена донная обсерватория (Monterey Ocean Broad Band – $MOBB$) в составе широкополосного цифрового сейсмографа, измерителя скорости и направления течений и измерителя давления. Конструкция станции была автономной со сменой блока памяти регистратора и блока питания каждые 3 месяца с помощью подводного робота. Блок сейсмографа был погружен на небольшую глубину в ил, а блоки регистратора и питания расположены в специальной стойке на дне на расстоянии 11 м от блока сейсмографа [32].

На рис. 8 (справа) приведено распределение плотности скорости течений как функции азимута за 78-дневный период в месте постановки донной сеймостанции. Видны два доминирующих максимума течений сосредоточенных в секторах около 60° и 240° , связанных с полусуточными приливами и направленных вдоль оси каньона Монтерей перпендикулярно к континентальному шельфу. Третий максимум в секторе около 150° направлен примерно параллельно береговой линии и связан с океанским Калифорнийским течением.

В табл. 4 представлены определенные в соответствии с рис. 7 максимальные, преобладающие

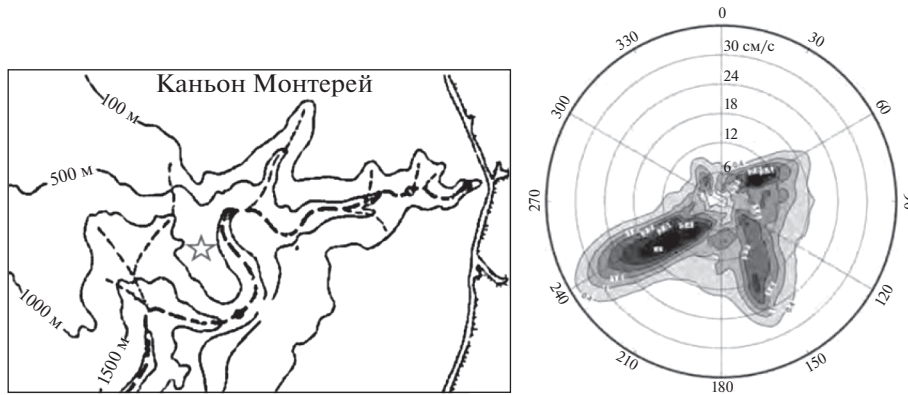


Рис. 8. Схема места постановки (обозначено звездой) донного сейсмографа МОБВ (слева). Распределение плотности скорости течений как функции направления и величины (справа) [32].

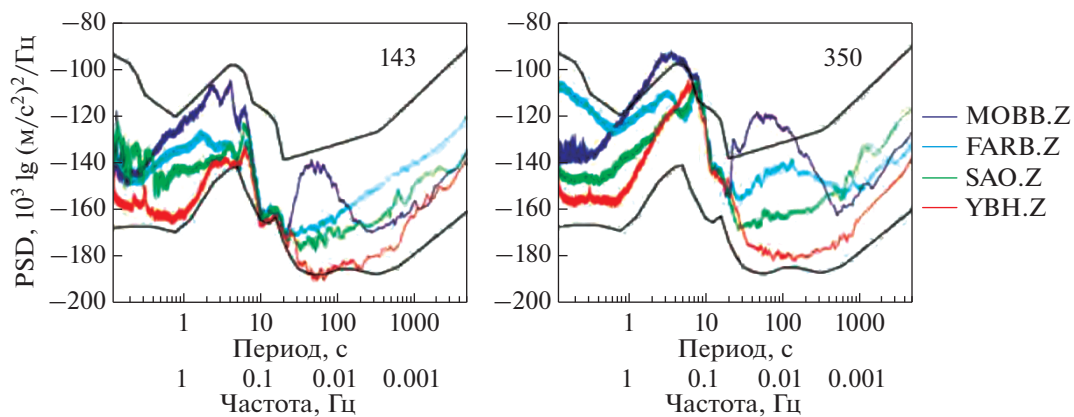


Рис. 9. Сравнение спектров микросейсм, зарегистрированных донным сейсмографом МОБВ, островной станцией FARB и двумя другими близкими станциями наземной сети. Записи выбраны в “тихий день” волнения (143) и “бурный” день (350) [32].

и минимальные (на уровне 0.4) скорости течений для трех основных направлений 240°, 60° и 150°. В соответствие с этими скоростями были рассчитаны числа Рейнольдса и частоты акустических полей, которые могут возбуждаться этими потоками вокруг элементов донной станции.

Поскольку блок сейсмоприемников в данном эксперименте был погружен в дно, завихрения могут образовываться вокруг расположенной на дне на расстоянии 11 м от этого блока стойки со сменными блоками регистрации и питания. Ориентировочно примем характерные общие размеры стойки 1 м и тонкомерных элементов (кабе-

лей) 0.01 м. Результаты расчетов приведены в табл. 5.

Из таблиц следует, что при данных скоростях и направлениях течений (табл. 4) и заданных характерных размерах элементов донной станции режимы обтекания могут быть в зависимости от величины чисел Рейнольдса ламинарным, вихревым, переходным или турбулентным (табл. 2, 5). При этом акустические помехи могут занимать широкий частотный диапазон от 0.004 Гц до 7 Гц, что наблюдалось на практике (рис. 9).

Следует отметить, что эксплуатация станции показала сильное влияние придонных течений в этом регионе на регистрацию сейсмических сигналов. На рис. 9 показаны спектры шумов (вертикальные компоненты), записанных донным сейсмографом на 143 и 350 день регистрации [32]. Эти дни выбраны по отсутствию существенных землетрясений и по показаниям волнового буя в заливе Монтерей как “тихий” день (143) и “бурный” день (350). Шкала частот приведена дополнительно для удобства сравнения со спектрами на рис. 11.

Таблица 4. Направления и скорости течений в месте постановки сейсмографа в каньоне Монтерей

Направление течений:		240°	60°	150°
Скорость (м/с)	Максимальная	0.35	0.20	0.27
	Преобладающая	0.15	0.10	0.18
	Минимальная	0.05	0.02	0.02

Таблица 5. Частоты помех, вызываемых придонными течениями, в районе постановки донного сейсмографа в каньоне Монтерей

	Скорость течений:	Направление:	240°	60°	150°
Re (4°C)	Максимальная		$(194-1.94) \times 10^3$	$(111-1.11) \times 10^3$	$(150-1.5) \times 10^3$
	Минимальная		$(28-0.28) \times 10^3$	$(11.1-0.11) \times 10^3$	$(11.1-0.11) \times 10^3$
Частота помех f (Гц)	Максимальная		0.07–7	0.04–4	0.054–5.4
	Преобладающая		0.03–3	0.02–2	0.036–3.6
	Минимальная		0.01–1	0.004–0.4	0.004–0.4

На рис. 9 черным цветом для сравнения обозначены максимальный и минимальный обобщенные уровни шумов (микросейсм) для наземных станций USGS. В записях МОВВ (фиолетовый цвет) наблюдаются высокий уровень шума с периодами между 20 и 500 секундами (частоты 0.05–0.002 Гц), вызванный, вероятно, придонными течениями и, возможно, инфрагравитационными волнами в “бурный” день. Близкий по форме спектр в этой области периодов наблюдается и на островной станции (голубой цвет). Уровни шума в районе пика микросейсм между 1 и 20 секундами заметно увеличены в “бурный” день (350) по сравнению с “тихим” (143) на всех станциях. В области коротких периодов менее 1 секунды уровень шума существенно выше в “бурный” день только на островной станции, вероятно, вследствие прибора. Уровень шума в МОВВ между 10 и 20 секундами сопоставим с наземной станцией УВН, которая является одной из самых “тихий” станций сети. Результаты рис. 8 показывают, что отмеченные помехи вызваны не внешним волнением, а интенсивными придонными течениями.

Эксперимент в районе Гавайских островов, США

Существенный интерес представляет рассмотрение работы сейсмографов, помещенных в донную скважину. Такой способ регистрации сейсмических сигналов практикуется с 90-х годов прошлого века, и вначале на него возлагались большие надежды вследствие потенциальной возможности избавиться как от влияния придонных течений, так и от контакта с мягким дном. Однако, вскоре выяснилось, что в этом способе наблюдается интенсивная низкочастотная помеха (ниже 0.1 Гц), от которой не удается избавиться. Причину этой помехи разработчики видели в плохом контакте блока сейсмоприемников со стенками скважины (installation noises). Однако, применение различных способов крепления этого блока не приносило существенного успеха [23, 30, 33, 35].

В качестве примера рассмотрим результаты масштабного сейсмологического эксперимента,

который был проведен в 1998 г. в Тихом океане в районе Гавайских островов [35]. Одновременно в широкой полосе частот регистрировались сейсмические сигналы на дне, в толще донных осадков, в глубокой донной скважине и на острове Оаху (станция Кипапа Всемирной сейсмографической сети GSN). Частотные характеристики всех сейсмографов в полосе частот от 0.01 Гц до 5 Гц практически совпадали.

На рис. 10 представлена донная сейсмостанция, использовавшаяся в этом эксперименте для регистрации сейсмических сигналов на дне и при небольшом заглублении сейсмографа. Станция состоит из широкополосного сейсмографа ВВОBS, (цилиндр на переднем плане) и размещаемого на поверхности дна блока (на заднем плане рисунок), включающего дополнительный регистратор данных, акустический маяк-ответчик и блок питания. Поверхностный блок использовался для поиска и подъема сейсмостанции.

Для регистрации на морском дне и при заглублении в ил использовались сейсмографы типа Guralp CMG-3T. Сейсмические датчики здесь размещены в прочных цилиндрических корпусах с электроникой для сбора данных и батареями. Для лучшего сцепления с дном к корпусам сейсмографов были присоединены плоские диски (рис. 10). Заглубленный сейсмограф был зарыт примерно на 1 м в морское дно с помощью специальной буровой рамы. После установки буровая рама была возвращена на корабль. Модули для поиска и подъема станций были отнесены примерно на 12–20 м от сейсмографов для уменьшения влияния помех от придонных течений.

Для регистрации сейсмических сигналов в скважине использовался сейсмограф специальной конструкции, но по частотным характеристикам аналогичный Guralp CMG-3T. Установка этого сейсмографа производилась с борта судна с помощью специальной рамы через установочную воронку в устье скважины. Воронка находилась в устье в течение эксперимента.

Все подводные сейсмографы располагались на расстояниях от 200 до 300 м друг от друга и от скважины, островной сейсмограф — на расстоянии около 200 км от донной скважины. К сожалению



Рис. 10. Широкополосный донный сейсмограф США (Морская физическая лаборатория Скрипса) с заглубляемым в слой осадков блоком сейсмоприемников Guralp CMG-3T (на переднем плане) и размещаемом на поверхности дна блоком обнаружения и подъема [35].

нию, нет сведений об измерении течений в этом эксперименте, но по общим литературным данным в этом регионе имеются значительные придонные течения, связанные с мощным Северным пассатным течением в Тихом океане [1, 8]. Сложный рельеф дна существенно затрудняет их изучение. Однако, по результатам Гавайского эксперимента по регистрации сейсмических шумов можно судить об их наличии и существенной роли.

На рис. 11 представлены спектры шумов, измеренных скважинным (синий цвет), донным (фиолетовый) и заглубленным в слое осадков (голубой) сейсмографами, а также сейсмографом на станции Кипапа (оранжевый цвет) (на левом рисунке — для вертикальных компонент, на правом —

для горизонтальных). Пунктиром показаны модельные спектры для сети наземных сейсмографов.

Максимумы всех спектров совпадают с известным максимумом микросейсм на частотах около 0.2–0.3 Гц. На частотах выше этого максимума уровень шумов скважинного и островного сейсмографов в общем ниже (примерно на 20 дБ) по сравнению с двумя другими. Хотя на частоте около 5 Гц наблюдается подъем шума для островного прибора, возможно техногенного характера.

На частотах ниже 0.1 Гц в районе спектрального минимума микросейсм максимальный шум (на 20 дБ) наблюдается для донного сейсмографа до частоты 0.004 Гц. Ниже 0.01 Гц шум островного и заглубленного сейсмографов намного ниже, чем скважинного — в среднем на 50 и 40 дБ соответственно. На частотах 0.004–0.02 Гц имеется заметный подъем шумов для донного и заглубленного сейсмографов. Возможно, это связано с резонансом внутренних волн на этих частотах.

Обобщая результаты этого эксперимента, следует отметить, что в области высоких частот (выше 0.2 Гц) минимальные шумы наблюдаются для островного и скважинного сейсмографов, а в области низких частот — для заглубленного и островного. Относительно высокий шум на высоких частотах для донного и заглубленного сейсмографов объясняется, вероятно, недостаточным разнесом модулей сейсмографов и блоков обнаружения и подъема (12–20 м). На тонкомерных элементах этих блоков (рис. 10) генерируются высокочастотные поля помех.

Высокий шум в скважинном сейсмографе в области низких частот, по нашему мнению, объясняется возбуждением этой помехи придонными течениями, генерирующими сейсмоакустические поля в воде и донном массиве из-за большой установочной воронки в устье скважины высотой

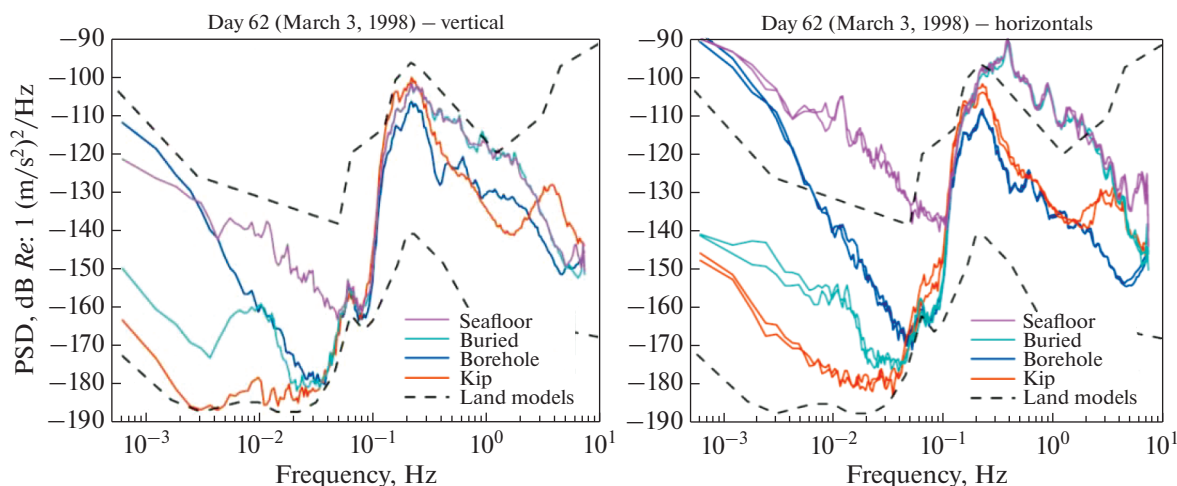


Рис. 11. Спектры шумов, зарегистрированных во время Гавайского эксперимента донными сейсмографами трех типов и сейсмографом на станции GSN Кипапа [35] (подробности в тексте).

и диаметром около 5 м. Этот элемент всегда присутствует при скважинных сейсмологических экспериментах. Следует отметить, что шумы ниже 0.1 Гц играют существенную отрицательную роль при регистрации удаленных землетрясений и медленных подвижек дна.

Оценить частотный диапазон возбуждаемой помехи можно с помощью соотношения Струхаля $f = Su/L$. Если принять характерные размеры препятствия $L = 1-5$ м, скорость придонных течений $u = 0.05-0.5$ м/с и $S = 0.2$, то частоты составляют от 0.1 Гц до 2×10^{-3} Гц, что соответствует наблюдавшимся значениям частот помех (рис. 11).

В заключение хотелось бы высказать мнение о том, что размещение сейсмографов в глубоких донных скважинах требует больших усилий, но, как показывает практика, не дало пока каких-либо преимуществ по сравнению с мелким их заглублением в слой осадков. Наличие крупных вспомогательных элементов на дне возле скважины приводит к появлению низкочастотных сейсмоакустических помех от придонных течений. Эти помехи распространяются в донном массиве так же успешно, как и сигналы землетрясений.

МЕТОДЫ БОРЬБЫ С ПОМЕХАМИ ОТ ПРИДОННЫХ ТЕЧЕНИЙ

Для борьбы с влиянием придонных течений следует применять как технические приемы, так и организационные мероприятия. К первым относится разработка специальных конструкций: как донных сейсмографов, так и вспомогательных элементов, необходимых для постановки и функционирования сейсмографов на дне. Организационные мероприятия состоят в выборе и исследовании места постановки донных сейсмографов, разработке способов этой постановки и ее осуществления. Основным критерием размещения донных сейсмографов являются, безусловно, задачи сейсмического исследования. Однако в рамках решения этих задач обычно есть возможность смещения места постановки на десятки или даже сотни километров, что позволяет в ряде случаев существенно снизить отрицательный эффект от придонных течений.

Выбор места постановки донных сейсмографов

Для успешного решения сейсмологических задач необходимо свести к минимуму воздействие придонных течений. Для этого следует выбирать сравнительно ровные участки дна, тщательно изучать направления и интенсивность течений, их изменчивость. В принципе, большие области дна океанов и морей представляют собой абиссальные равнины или абиссальные холмы с довольно гладким рельефом.

Имеются, безусловно, участки морского дна, отличающиеся высокой изрезанностью. Например, в районах континентальных склонов, срединных океанических хребтов, зонах субдукции и др. При этом следует учитывать масштаб течений и соотносить со средним масштабом изрезанности рельефа и физическими размерами аппаратуры. Анализ с использованием приведенных выше формул для оценки чисел Рейнольдса и частот помех показывает, что придонные течения в таких районах должны иметь вихревой и турбулентный характер, а возбуждаемые помехи располагаться в инфранизкочастотной области, зачастую вне предела частотного диапазона сейсмографа. Помехи, возбуждаемые течениями непосредственно на элементах сейсмографов, как показано в табл. 3, обычно лежат непосредственно в диапазоне рабочих частот.

Как показывает практика, придонные течения достаточно инерционны. Их изменчивость во времени связана с циклами приливов, ветровым климатом, поверхностными течениями и т.д. Отсюда следует, что их изучение должно охватывать полный цикл их изменчивости, включающий иногда несколько месяцев.

Подводя итоги, можно рекомендовать следующую последовательность организационных действий, направленных на уменьшение влияния придонных течений:

- Предварительное изучение течений и рельефа дна по имеющимся источникам в предполагаемом районе постановки донных сейсмографов. Выбор места постановки с возможно более гладким рельефом.

- Аппаратурное исследование течений на дне с учетом их возможных вариаций. Уточнение места постановки. Разработка способа постановки, выбор мест размещения сейсморегистрирующей и вспомогательной аппаратуры.

- Предварительные измерения уровня сейсмоакустических помех в месте постановки сейсмографа. Уточнение мест расположения основных и вспомогательных элементов сейсмографа.

- Заглубление блока сейсмоприемников в дно (полное или частичное). Рабочее размещение элементов донного сейсмографа. Определение основных метрологических характеристик.

К сожалению, насколько нам известно, в полной мере подобные мероприятия не проводились. Однако, даже частичное их проведение позволяет снизить уровень помех от придонных течений до приемлемого уровня.

Технические методы защиты донных сейсмографов от влияния придонных течений

Наиболее интенсивная акустическая помеха возбуждается в непосредственной близости за об-

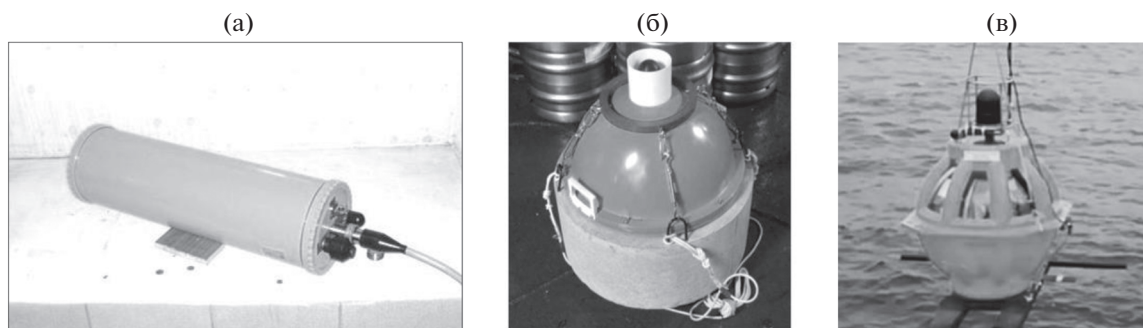


Рис. 12. Примеры донных сейсмографов ИО РАН с обтекаемой конструкцией корпуса. Кабельная донная сеймостанция КДСС (а), сейсмограф МПССР (морская придонная станция сейсмоакустической разведки) (б), донный сейсмограф ГНС-Ц (в).

текаемым телом при отрыве вихрей или вследствие пульсаций турбулентной зоны. В первом приближении этот источник можно считать монополю с характерным размером L , равным размеру обтекаемого тела. Поскольку длины возбуждаемых волн много больше размеров модулей сейсмографа и разноса между ними, то следует рассматривать поле в ближней зоне. Затухание помехи с расстоянием r в этом случае пропорционально $(L/r)^2$. Отсюда следуют основные методы борьбы с такими помехами – уменьшение вероятности возникновения вихрей и турбулентности за счет хорошей обтекаемости элементов сейсмографа, уменьшения его габаритов, заглубление блока сейсмоприемников в слой осадков и его вынос на значительное расстояние от источников помех [9, 12, 15].

На рис. 12 представлены примеры современных донных сейсмографов, конструкции которых разработаны с учетом влияния придонных течений. Сейсмографы имеют достаточно малые габариты, обтекаемую форму, наружные элементы прижаты к корпусу. Кабельная донная сеймостанция (а) разработки ИОРАН и ОКБ ОТ РАН, сейсмограф МПССР (морская придонная станция сейсмоакустической разведки) (б) разработки ИОРАН и донный сейсмограф ГНС-Ц, разработанный ИОРАН и “ИП Ильинский” (в) [15, 27].

Следует отметить, что в ряде случаев по условиям эксплуатации необходимо размещать блок сейсмоприемников или весь сейсмограф в отдельном модуле. На рис. 13б приведен широкополосный донный сейсмограф разработки ИОРАН, используемый при постановке на вязком мягком дне [13, 15]. В этом случае легкий блок сейсмоприемников находится на поверхности дна, а тяжелый балласт и приборный модуль медленно в течение нескольких часов или суток погружаются в ил. Погружение сопровождается микро толчками, которые могли бы вызвать импульсные помехи в блоке датчиков. На рис. 13в представлена схема постановки на шельфе донного сейсмогра-

фа МПССР разработки ИОРАН [27]. Такая схема используется при постановке на длительный срок для обеспечения необходимой плавучести сейсмографа.

В приведенных выше примерах чувствительные элементы сейсмографов достаточно обтекаемы, находятся близко ко дну или под дном. Поэтому они мало подвержены воздействию придонных течений. В то же время, часть оборудования, расположенного относительно высоко над дном, менее обтекаемо и может служить источником интенсивных помех от течений. Следует отметить, что соединительный кабель или трос между модулями также может служить источником помех.

В связи с уменьшением скорости придонных течений вблизи дна, чувствительные элементы сейсмографов необходимо помещать как можно ближе к дну, или заглублять в слой осадков. Для аппаратуры, которую по условиям эксплуатации необходимо располагать на поверхности дна, нужно сокращать вертикальные габариты и относить на достаточно большое расстояние от сейсмоприемников. В связи с этим существенное значение имеет величина разноса модулей и конструкция связи между ними. Ответ на эти непросые вопросы в первом приближении можно получить путем сочетания известных теоретических соотношений и экспериментальных данных.

Допустим, известны экспериментальные результаты среднего уровня помех за счет течений вблизи их источника [12, 15, 21], например, 1000 нм/с. Необходимо снизить этот уровень до минимального значения фоновых микросейсм (около 1 нм/с), т.е. в 1000 раз. Из [9, 12] следует, что в этом случае затухание помех с расстоянием пропорционально $(L/r)^2$. Приняв максимальный характерный размер турбулентности равный размеру обтекаемого тела ($L = 1$ м), получаем $r > 30$ м.

Подобным образом оценивается и затухание помехи от вихревого или турбулентного следа ($r > 33$ м). В широкополосных донных сейсмогра-

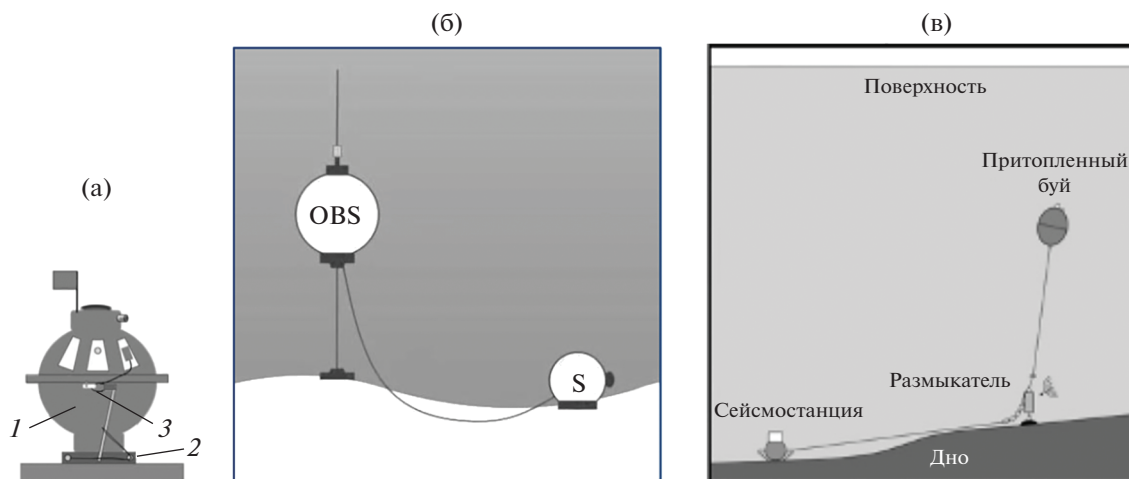


Рис. 13. Способы постановки донных сейсмографов: (а) – донный сейсмограф ГНС-Ц (1 – корпус, 2 – балласт, 3 – размыкатель); (б) – широкополосный автономный донный сейсмограф ШАДС с выносным блоком сейсмоприемников; (в) – донный сейсмограф МПССР на мелководном шельфе с подводным буйем.

фах ИО РАН длина соединительного кабеля между блоком сейсмоприемников и приборным контейнером составляет 50 м, что позволяет обеспечить их необходимый разнос. Для исключения возможных помех от течений вокруг соединительного кабеля или троса, эти элементы должны быть максимально прижаты ко дну, особенно вблизи блока сейсмоприемников.

Для осуществления постановки сейсмографа подобного типа была разработана специальная методика. Приборный контейнер вместе с балластом вывешивался за бортом обеспечивающего судна на грузовой стреле, кабель-трос разматывался на всю длину вдоль борта. По команде практически одновременно сбрасывались оба контейнера сейсмографа. Погружение происходило в следующем порядке: впереди опускался балласт, за ним на расстоянии длины буйрепа (3–4 м) приборный контейнер, далее на расстоянии длины кабель-троса (50 м) блок сейсмоприемников. Дна первым достигал балласт, над ним зависал приборный контейнер, затем опускался блок сейсмоприемников. Для его отдаления на требуемое расстояние вначале использовалась конструкция с гидродинамическим крылом. Затем выяснилось, что необходимый разнос может достигаться за счет жесткости кабель-троса. Было установлено, что жесткость некоторых типов кабель-тросов с полиэтиленовой изоляцией существенно увеличивается при охлаждении ниже 10°C . Такая температура наблюдается в большинстве случаев на глубинах более 500 м. Скорость погружения сейсмографа подобной конструкции составляет около 0.5 м/с. При постановке на глубины более 1000 м кабель-трос успевает существенно охладиться и его жесткости оказывается достаточно для требуемого удаления блока сейсмоприемников.

Применение донных сейсмографов обтекаемой конструкции позволяет существенно снизить помехи от придонных течений. При постановке автономного сейсмографа ИОРАН ШАДС по схеме рис. 12б в ноябре 1991 г в районе Азорских островов на глубину около 1700 м был получен на частотах около 0.05 Гц (“окно прозрачности” в спектре микросейсм) особенно низкий уровень суммарных шумов на входе, около 10^{-8} м/с [28]. В результате было зарегистрировано удаленное (10 тыс. км) землетрясение с эпицентром в Гималаях и магнитудой около 6.7.

ВЫВОДЫ

1. Придонные течения возбуждаются многочисленными источниками, присутствуют практически во всех районах морей и океанов и отличаются большой изменчивостью по интенсивности и направлению.
2. При регистрации сейсмических сигналов на дне акваторий придонные течения могут создавать серьезные помехи в широком частотном диапазоне за счет прямого воздействия на чувствительные элементы донных сейсмографов и путем возбуждения сейсмоакустических полей в водной среде и донном массиве. Подобные помехи являются значительным препятствием для развития морской сейсмологической сети.
3. Особенности придонных течений являются уменьшение скорости при сближении с дном и сильная зависимость от рельефа дна. Поэтому для уменьшения помех стремятся ставить донные сейсмографы на относительно ровных участках, заглублять в слой осадков или размещать в донных скважинах. Однако, как показывает практика, эти меры не являются достаточными.

4. Вследствие эксплуатационной необходимости часть элементов донных сейсмографов располагается на поверхности дна (устройства связи и всплывающие, сменные блоки питания и регистрации, установочная воронка в скважине и др.). Вокруг этих элементов или неровностей дна образуются вихри, которые являются источниками сейсмоакустических помех.

5. Для снижения влияния помех от придонных течений необходимо тщательно исследовать места постановки донных сейсмографов с целью изучения микрорельефа дна и интенсивности и направления течений в слое толщиной в единицы метров. Располагать донные сейсмографы желательно на относительно ровной поверхности, избегая глубоких каньонов, крутых склонов, близких вершин холмов.

6. Конструктивно элементы донных сейсмографов должны иметь обтекаемую форму, располагать их необходимо максимально приближая ко дну. Блок сейсмоприемников следует относить на расстояние в несколько десятков метров от возможных источников сейсмоакустических помех. Заглублять блок сейсмоприемников возможно на относительно небольшую глубину.

7. Размещение сейсмографов в глубоких донных скважинах вызывает сомнение, так как требует применения крупногабаритных установочных устройств, вокруг которых возбуждаются сейсмоакустические помехи от придонных течений, распространяющиеся в воде и донном массиве.

Благодарности. Автор приносит глубокую благодарность коллегам по Институту океанологии им. П.П. Ширшова РАН, коллективу ОКБ океанической техники РАН, а также соавторам по публикациям, принимавшим активное участие в течение ряда лет в получении и обсуждении материалов, послуживших основой для данной статьи.

Источники финансирования. Исследования выполнены в рамках госзадания ИО РАН (№ FMWE-2021-0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безруков Ю.Ф., Тамайчук А.Н. Течения в Мировом океане. Симф.: Тавр. Универ., 2005. 60 с.
2. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. М.: Наука, 1981. 206 с.
3. Болдырев С.А. Природа сейсмоакустического шума и явлений, зарегистрированных донными сейсмографами // Вулканология и сейсмология. 1995. № 6. С. 94–107.
4. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир, 1986. 184 с.
5. Вовк И.В. Физический взгляд на природу эоловых тонов // Акустический вестник. 2007. Т. 10. № 2. С. 22–32.
6. Жданов М.А., Левченко Д.Г., Соловьев С.Л. Об изменении донных сейсмических шумов в диапазоне 0.01–10 Гц (Северо-Эгейский трог) // Океанология. 1993. № 2. С. 299–303.
7. Зверев С.М. Донные сейсмические наблюдения при ГСЗ на море // Сейсмические приборы. 2005. Вып. 41. С. 21–30.
8. Иванов В.А., Показеев К.В., Шрейдер А.А. Основы океанологии. СПб.: Лань, 2008. 573 с.
9. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 475 с.
10. Контарь Е.А., Левченко Д.Г., Соловьев С.Л. Придонные течения в сейсмически активном районе Атлантического океана // Докл. РАН. 1990. Т. 310. № 5. С. 1231–1235.
11. Контарь Е.А., Левченко Д.Г., Соловьев С.Л. Влияние придонных течений в сочетании с рельефом дна на шумовые условия в точке наблюдений // Вулк. Сейсмол. 1991. № 4. С. 97–103.
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. С. 137–193, 350–410.
13. Левченко Д.Г. Особенности конструирования широкополосных донных сейсмографов // Океанология. 2001. Т. 41. № 4. С. 613–626.
14. Левченко Д.Г. Результаты регистрации широкополосных (0.003–10 Гц) сейсмических сигналов на морском дне // Океанология. 2002. Т. 42. № 4. С. 620–631.
15. Левченко Д.Г. Регистрация широкополосных сейсмических сигналов и возможных предвестников сильных морских землетрясений на морском дне. М.: Научный мир, 2005. С. 73–80, 112–118.
16. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М. Л.: ГИТТЛ, 1950. 676 с.
17. Малюга В.С. Численное моделирование обтекания сферы потоком несжимаемой жидкости // Прикладная гидромеханика. 2013. Т. 15. № 3. С. 43–67.
18. Рэлей. Теория звука. Т. 2. М.-Л.: ГИТТЛ, 1944. 476 с.
19. Рыбак С.А., Серебряный А.Н. О генерации звука внутренним бором // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 6. С. 773–775.
20. Самолубов Б.И. Придонные стратифицированные течения. М.: Научный мир, 1999. 463 с.
21. Соловьев С.Л. Сейсмологические донные наблюдения в СССР и за рубежом. М.: Наука, 1986. 118 с.
22. Федяевский К.К., Блюмина Л.Х. Гидроаэродинамика отрывного обтекания. М.: Машиностроение, 1977. 120 с.
23. Araki E., Suyehiro K. Long period seismic noise in deep ocean boreholes // Proc. ONP. ION Joint Symp. Japan, 2001. P. 112–114.
24. Duenneber F.K., Blackinton G., Sutton G.N. Current generated noise recorded on ocean bottom seismometers // Mar. Geophys. Res. 1981. V. 5. № 1. P. 109–115.
25. Kasahara J., Koresava S., Nagumo S. Experimental results of vortex generation around ocean – bottom seismograph due to bottom current // Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo. 1980. V. 55. P. 169–182.
26. Kovachev S.A., Demidova T.A., Sonkin A.V. Properties of Noise Registered by Pop-Up Ocean-Bottom Seismographs // J. Atm. Ocean. Techn. 1997. V. 14. P. 883–888.

27. Krylov A.A., Egorov I.V., Kovachev S.A. et al. Ocean-Bottom Seismographs Based on Broadband MET Sensors: Architecture and Deployment Case Study in the Arctic // *Sensors*. 2021. V. 21. 3979. <https://doi.org/10.3390/s21123979>
28. Levchenko D.G., Soloviev S.L., Son'kin A.V., Voronina E.V. Recording of ocean-bottom seismic noise and of a strong earthquake in the Himalayas by broadband digital OBS installed on the Mid-Atlantic ridge // *Physics Earth and Planetary Interiors*. 1994. V. 84. P. 305–320.
29. Lighthill M.J. On sound generated aerodynamically I. General theory // *Proc. R. Soc. Lond.* 1952. A211. P. 564–587. <https://doi.org/10.1098/rspa.1952.0060>
30. Montagner J.P., Karczewski J.F., Romanowicz B. and the Geoscope Group. The GEOSCOPE network: the state of the art and perspectives // *Abstract Book, Intern. Simp. Ten Years of GEOSCOPE Broadband Seismology*. Paris, France. 1992. P. 6–15.
31. Morozov E.G., Tarakanov R.Y., Frey D.I. Bottom Gravity Currents and Overflows in Deep Channels of the Atlantic Ocean. Springer Nature Switzerland AG, 2021. 505 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-83074-8>
32. Romanowicz B., Stakes D., Dolenc D. et al. The Monterey Bay broadband ocean bottom seismic observatory // *Annals Geoph.* 2006. V. 49. № 2/3. P. 607–623.
33. Shinohara M., Araki E. Installation of borehole geophysical observatories in the Western Pacific by Ocean Hemisphere Project // *Proc. ION Joint Symp. Japan*. 2001. P. 16–20.
34. Sumer B.M., Fredsoe J. Hydrodynamics around cylindrical structures // *Adv. Ser. Ocean Eng.* 2000. V. 26.
35. Stephen R.A., Spiess F.N., Collins J.A. et al. Ocean Seismic Network Pilot Experiment // *GGG*. 2003. V. 4. № 10/31. P. 1–38. <https://doi.org/10.1029/2002GC000485>

Effect of Bottom Currents on Seismic Registration on the Seabed

D. G. Levchenko[#]

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#]*e-mail: levch35@mail.ru*

Registration of seismic signals at the bottom of the water areas in most cases is accompanied by intense noises, the sources of which are bottom currents. So far, no effective ways have been found to combat this phenomenon, which significantly complicates the development of the marine seismological network. The main problems are that such noise is generated both on the unevenness of the bottom and on the elements of equipment, which, according to the operating conditions, should be on the bottom surface. In the proposed work, a number of mechanisms for the generation of such contaminants are considered, including due to the direct effect of stationary and non-stationary flows on the sensitive elements of bottom seismographs, and due to the generation of seismoacoustic fields in the aquatic environment during vortex and turbulent flows. The results of recording seismic signals at the bottom, in the sediment layer and in the bottom borehole in the presence of intense noise from currents are compared. A number of practical recommendations are given to significantly reduce the effect of such interference.

Keywords: bottom seismographs, bottom currents, interference, impact mechanisms, physical modeling, marine experiments, noise reduction methods