

УДК 551.463.228

ВЛИЯНИЕ ШКВАЛОВ И ВЕТРОВЫХ ПОРЫВОВ НА ФЛУКТУАЦИИ УРОВНЕЙ ПОДВОДНОГО ШУМА

© 1998 г. А. В. Фурдуев, А. А. Аредов, Н. Н. Охрименко

Акустический институт им. академика Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 25.12.96 г.

Статья посвящена анализу влияния ветровых неоднородностей на флуктуации звукового давления спектральных составляющих естественного морского шума. На экспериментальных примерах показано, что параметры огибающей шума зависят от соотношения между пространственными масштабами ветровых возмущений и размером "контролируемой" гидрофоном области на поверхности моря. Введено удобное для построения модели шумового поля понятие радиальной функции чувствительности гидрофона к распределенным поверхностным дипольным источникам шума. Функция поверхностной чувствительности гидрофона (ФПЧ) зависит от профиля скорости звука, глубины погружения гидрофона, частотно зависимых поглощения в среде, коэффициента отражения звука от дна, рассеяния звука в толще и от границ волновода. Свертка ФПЧ с движущейся мозаикой ветровых порывов определяет характеристики флуктуаций шума. Показано, что ФПЧ интегрирует маломасштабные ветровые порывы, при этом размеры усредняемых поверхностных флуктуаций скорости ветра тем больше, чем глубже опущен гидрофон. Приведенные результаты эксперимента подтвердили адекватность модели флуктуаций шумового поля построенной с использованием ФПЧ. Показано, что локально измеряемая над точкой звукоприема скорость ветра не всегда определяет уровень шума и параметры его флуктуаций.

Важным параметром определяющим уровень шума, его флуктуации и другие характеристики, является скорость ветра над поверхностью шумообразующей акватории. Связь скорости ветра со спектральными уровнями подводного шума изучалась многими экспериментаторами [1–9]. Все авторы принимают степенную связь между звуковым давлением шума и скоростью ветра, однако показатель степени при скорости ветра существенно отличается у разных авторов. При этом оказывается, что уровни шума при похожих условиях генерации шума также различны. Попытку объяснить это условиями формирования шума в том или ином регионе предприняли авторы [6], учитывая в основном различие акустических характеристик дна в различных районах. Они достигли определенного прогресса, приблизив оценки уровней шума в различных районах к расчетной величине, однако и в [6], и в [9] авторы не обращались к изменчивости шумового поля.

Анализ изменчивости уровней шума с учетом практически всех акустико-океанологических параметров и учет их в модели шумового поля позволяет включить в объяснение наблюдаемых рассогласований и факторы связанные с глубиной приема, неполным знанием скоростей ветра на всей шумообразующей акватории. Такой подход, как нам кажется, приближает решение задачи о зависимости уровня шума от скорости ветра

и помогает усовершенствовать существующую модель формирования шумового поля.

Эффекты, возникающие при неоднородностях ветра, можно наблюдать на вертикальной характеристике анизотропии при перемещении шквала по поверхности океана. Такие измерения вертикальных характеристик были проведены, и их результаты представлены на рис. 1. Окружающая обстановка контролировалась радиолокатором, который на достаточном расстоянии и весьма рельефно позволял обнаруживать шквалы, фиксировать их размеры и форму. Измерения проводились с использованием вертикальной антенны длиной 7.5 м на частоте – 2.5 кГц, ширина главного максимума диаграммы направленности составляла 6° , а уровень первого бокового лепестка с учетом реальной чувствительности гидрофонов равнялся –28 дБ. На рис. 1а рядом с вертикальным профилем скорости звука схематично показаны положения шквала и лучи, соединяющие точку приема с участками поверхности, подвергавшимися воздействию шквала в разные моменты измерений. Шквал овальной формы со средним размером около 7 км перемещался в направлении на судно и прошел мимо антенны при минимальном расстоянии от края дождя до антенны 3 км. На рис. 1б приведены вертикальные характеристики анизотропии в диапазоне $\pm 90^\circ$ от горизонтали, полученные в 1/3-октавной полосе анализа на частоте 2.5 кГц. Расстояние до ближ-

ней границы шквала составляло 20 км (кривая 1), 6 км (кривая 2) и 3 км (кривая 3). Для сравнения нанесена характеристика анизотропии (кривая 4), полученная в том же месте при отсутствии в радиусе 64 миль (радиус действия радиолокатора) дождевых туч и шквалов. Скорость ветра в период всех измерений была постоянной и составляла 4–5 м/с. При приближении исследуемого шквала к антенне в стороне (более 25 км), наблюдалось появление дождевых туч, явившихся, по-видимому, причиной роста интенсивности шума на кривых 2 и 3 при углах прихода $-10^\circ \dots -30^\circ$. Влияние шквала заметно только при отрицательных углах прихода (со стороны дна), так как для положительных углов оно маскируется шумом местных ветровых источников. По положению максимумов, создаваемых дождевым шквалом на характеристиках анизотропии, можно оценить расстояние до его центра. Оценка дает 24 км для кривой 1; 9 км – для кривой 2; 6 км – для кривой 3, что соответствует данным радиолокатора. Следует отметить, что уровень шума, принимаемого контрольным ненаправленным гидрофоном, расположенным в центре антенны, за время измерений изменялся всего в пределах 1.5 дБ и практически соответствовал уровню шума в отсутствие шквала. Этот факт, наряду с компьютерными модельными исследованиями, позволяет сделать вывод о быстром спадании влияния шума от локально-распределенного источника на уровень ненаправленных шумов.

На рис. 1 в показан результат свертки характеристики анизотропии шума и диаграммы направленности антенны. Расчет проведен по модели, учитывающей наличие на поверхности океана локально распределенного источника шума, представляющего собой круглое пятно в области расположения шквала, в котором плотность мощности и диаграмма направленности шумовых источников отличаются от соответствующих характеристик на окружающей акватории. Диаметр шквала на поверхности 7 км, расстояние до ее ближней границы 20 км, 6 км, 3 км соответственно для кривых 1, 2, 3. Кривая 4 – расчет в отсутствие шквала. Диаграмма направленности антенны аппроксимировалась главным максимумом шириной 6° по уровню 0.7 (по давлению) и постоянным боковым ореолом – 30 дБ. При расчетах не учитывалось возможное влияние других шквалов; в силу этого, на расчетных кривых отсутствует наблюдающийся в эксперименте рост интенсивности шума при углах $-10^\circ \dots -30^\circ$ (кривые 2 и 3). Положение максимумов и их форма указывают на достаточно адекватное соответствие модели реальной шумообразующей обстановке на акватории.

Связь абсолютных значений звуковых давлений спектральных составляющих подводного шума со скоростью ветра исследовалась многими ав-

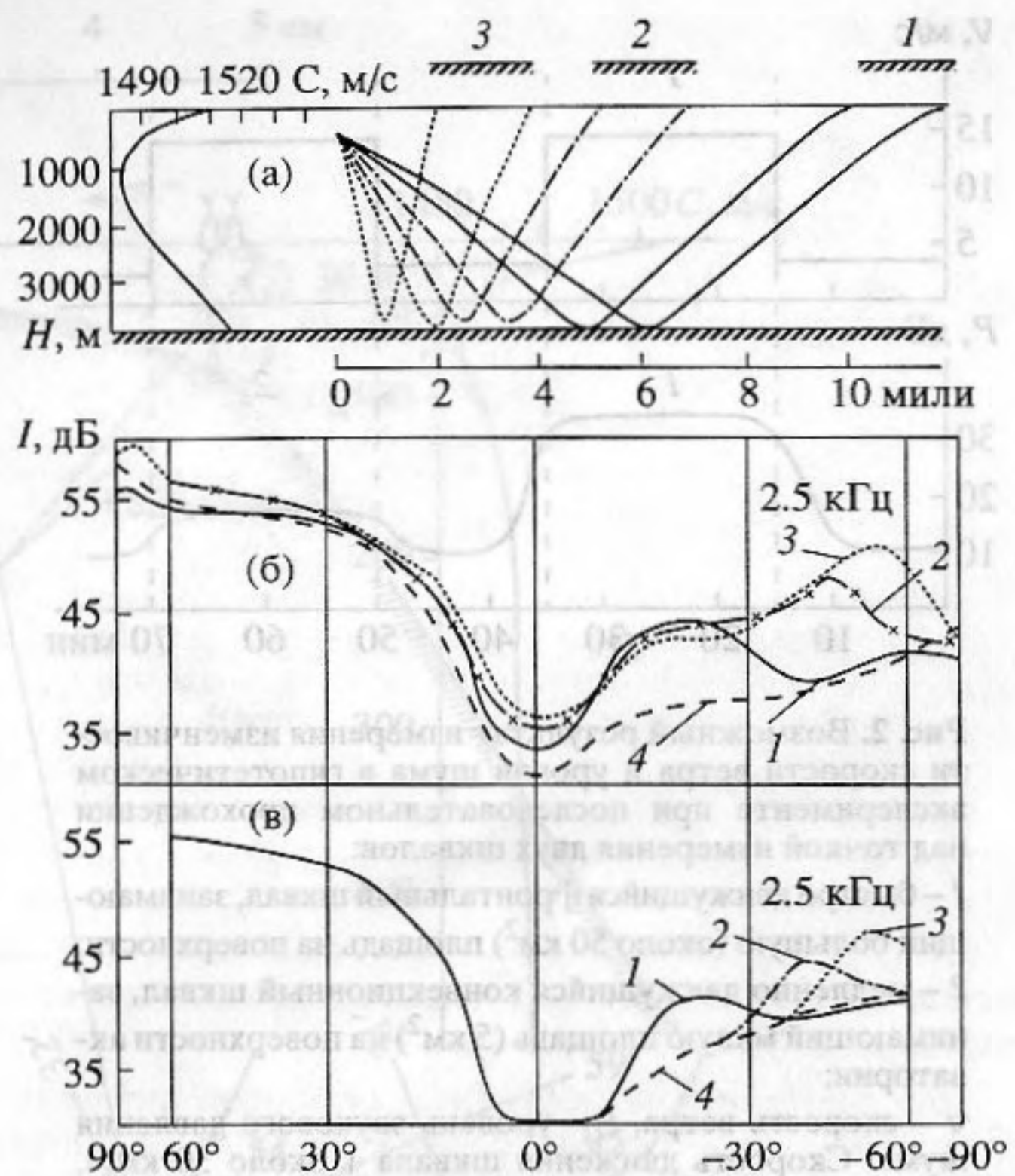


Рис. 1. Влияние дождевого шквала на вертикальную анизотропию шумового поля:

- а – вертикальный профиль скорости звука и расположение дождевого шквала во время измерений;
- б – измеренные вертикальные характеристики анизотропии;
- в – расчет для условий эксперимента;
- 1 – расстояние до шквала 28 км;
- 2 – расстояние до шквала 6 км;
- 3 – расстояние до шквала 3 км;
- 4 – туч нет.

торами [2–4, 6, 8, 9]. При этом их данные зачастую расходятся друг с другом. При одной и той же скорости ветра полученные в различных и даже в одних и тех же районах, но в разных экспериментах уровни шума отличаются иногда на 10–15 дБ [4, 6].

Изменчивость уровней шума вполне обоснованно и однозначно связывается с изменением скорости ветра над акваторией. Представлялось интересным определить причину столь большого разброса данных об уровне шума.

Была выдвинута гипотеза, согласно которой основными причинами наблюдаемого рассогласования данных являются следующие.

1. Зависимость уровня шума от условий распространения в районе (т.е. от затухания, рефракции, акустических свойств дна, глубины места и глубины погружения гидрофона).
2. Зависимость уровня шума от соотношения между пространственно-временными параметрами всегда изменчивого ветрового поля и прост-

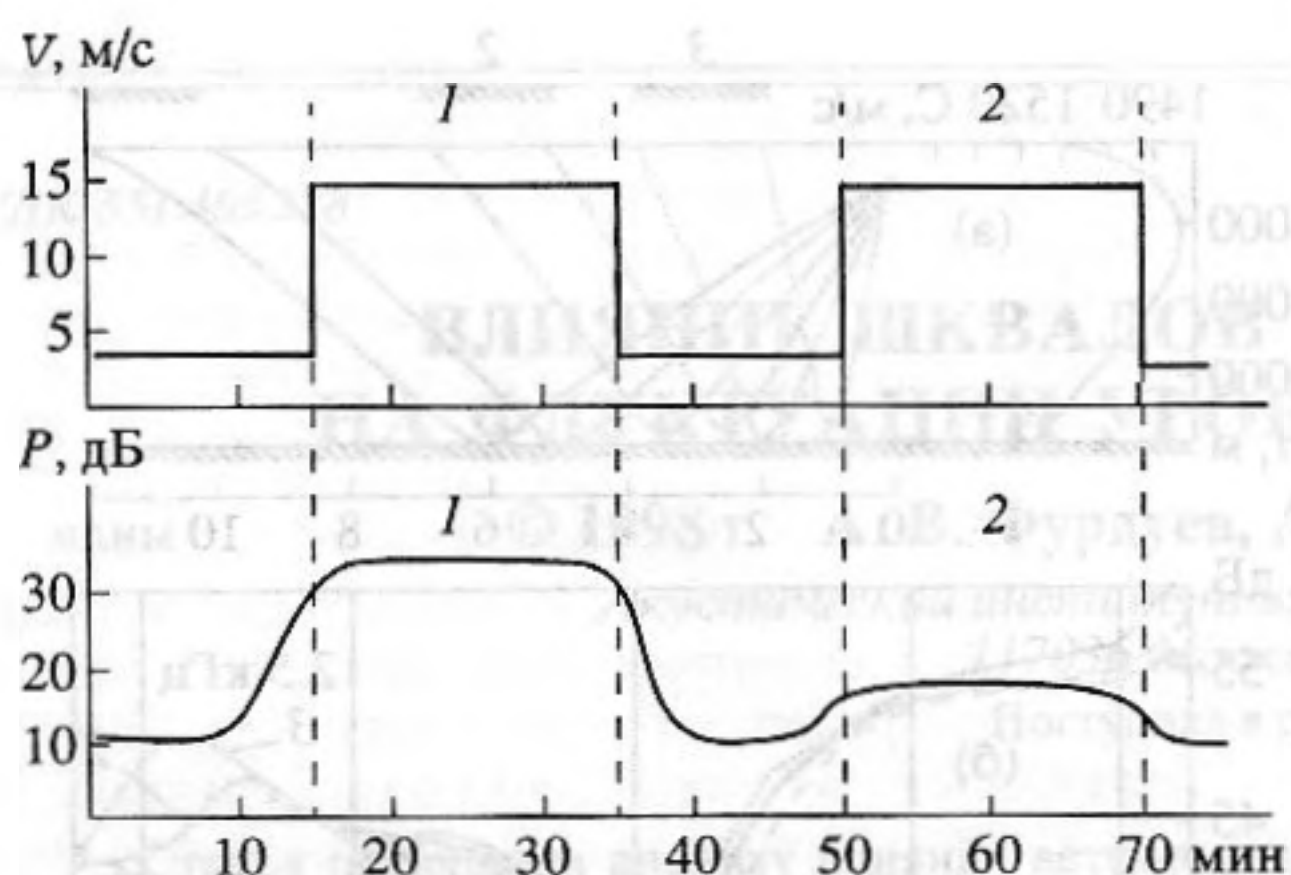


Рис. 2. Возможный результат измерения изменчивости скорости ветра и уровня шума в гипотетическом эксперименте при последовательном прохождении над точкой измерения двух шквалов:

1 – быстро движущийся фронтальный шквал, занимающий большую (около 50 км^2) площадь на поверхности; 2 – медленно движущийся конвекционный шквал, занимающий малую площадь (5 км^2) на поверхности акватории;

v – скорость ветра, P – уровень звукового давления шума. Скорость движения шквала 1 около 30 км/ч , шквала 2 – 3 км/ч .

ранственной чувствительностью к поверхностным источникам шума гидрофона, погруженного на заданную глубину.

3. Методологические погрешности измерений (когда шум и ветер недостаточно усредняются во времени, когда применяются неточечные приемники, погруженные на разные глубины и когда неизвестна изменчивость и средняя скорость ветра на всей шумообразующей акватории и т.п.).

Анализ ошибок измерений (п. 3) практически невозможен, т.е. обычно трудно найти исчерпывающие ссылки на методы измерения, обработки и акустико-океанологические условия эксперимента. Можно лишь констатировать один несомненный факт: скорость ветра всегда измерялась только в одной точке, в то время как принимаемый шум всегда является результатом свертки мозаики поверхностной плотности мощности источников шума с функцией чувствительности гидрофона к поверхностным источникам.

Введя понятие функции чувствительности гидрофона к поверхностным источникам (ФПЧ), авторы настоящей статьи разработали компьютерную модель расчета ФПЧ в зависимости от частотного диапазона, профиля скорости звука, глубины места, акустических характеристик дна, поверхности, рассеяния и поглощения звука в толще вод, глубины погружения приемника, от его направленности и от направленности поверхностных источников шума. Несомненно, что ФПЧ позволяет учесть эффект района и оценить

флуктуации шума по изменчивости скорости ветра (однозначно определяющей поверхностную плотность мощности источников шума). Действительно, рассмотрим, например, две ситуации, часто встречающиеся при измерениях.

Предположим, что для данной частоты и глубины погружения гидрофона 90% энергии шумового поля определяются кругом с известным диаметром на поверхности акватории над гидрофоном, а ветер и шум измеряются в точке над и под центром этого круга. Предположим теперь, что погода во всем окружающем регионе тихая, стабильная и характеризуется устойчивым ветром $3\text{--}4 \text{ м/с}$. Представим также, что над гидрофоном проходят поочередно два шквала со скоростью 15 м/с , но один из них (скажем, первый) движется быстро, занимая площадь, превышающую по размерам круг, формирующий шум. Тогда мы получим на записи ветра и шума приблизительно то, что показано в левой части рис. 2: увеличение шума на 20 дБ при изменении ветра от 3 до 15 м/с .

Предположим, что второй шквал (так же со скоростью ветра 15 м/с) движется медленно и занимает площадь на поверхности, существенно меньшую площади круга. В этом случае, мы получим ту же картину, зарегистрированную анемометром по изменчивости скорости ветра, но существенно меньшее (всего на 8 дБ) и более плавное изменение уровня шума. Эта упрощенная иллюстрация демонстрирует вполне реальную ошибку эксперимента, если он проводится без анализа интегрирующей способности ФПЧ, согласованного с пространственно-временной изменчивостью ветровых полей и без контроля скорости ветра на всей “слышимой” гидрофоном акватории.

Приведенное соотношение между размерами шквалов и скоростью их перемещения по акватории вполне реальны и типичны. Действительно, фронтальный шквал обычно движется очень быстро и имеет большую протяженность, чем, например, конвективный шквал, который может практически стоять на месте и, если движется, то всегда медленнее фронтального. Таким образом, очевидно, что для оценок флуктуаций шума, его нестационарности, необходимо знание характерной изменчивости ветровых полей и функции чувствительности гидрофона к поверхностным источникам шума.

Следует отметить, что ФПЧ определяется также и глубиной погружения гидрофона. Действительно, скажем, в типичных для тропиков гидрологических условиях площадь поверхности, формирующая (например, для частоты 3 кГц) основную энергию шумового поля для глубины погружения приемника $50\text{--}100 \text{ м}$ будет в 30 раз меньше, чем для приемника на глубине порядка 1000 м . Таким образом, для этих приемников при

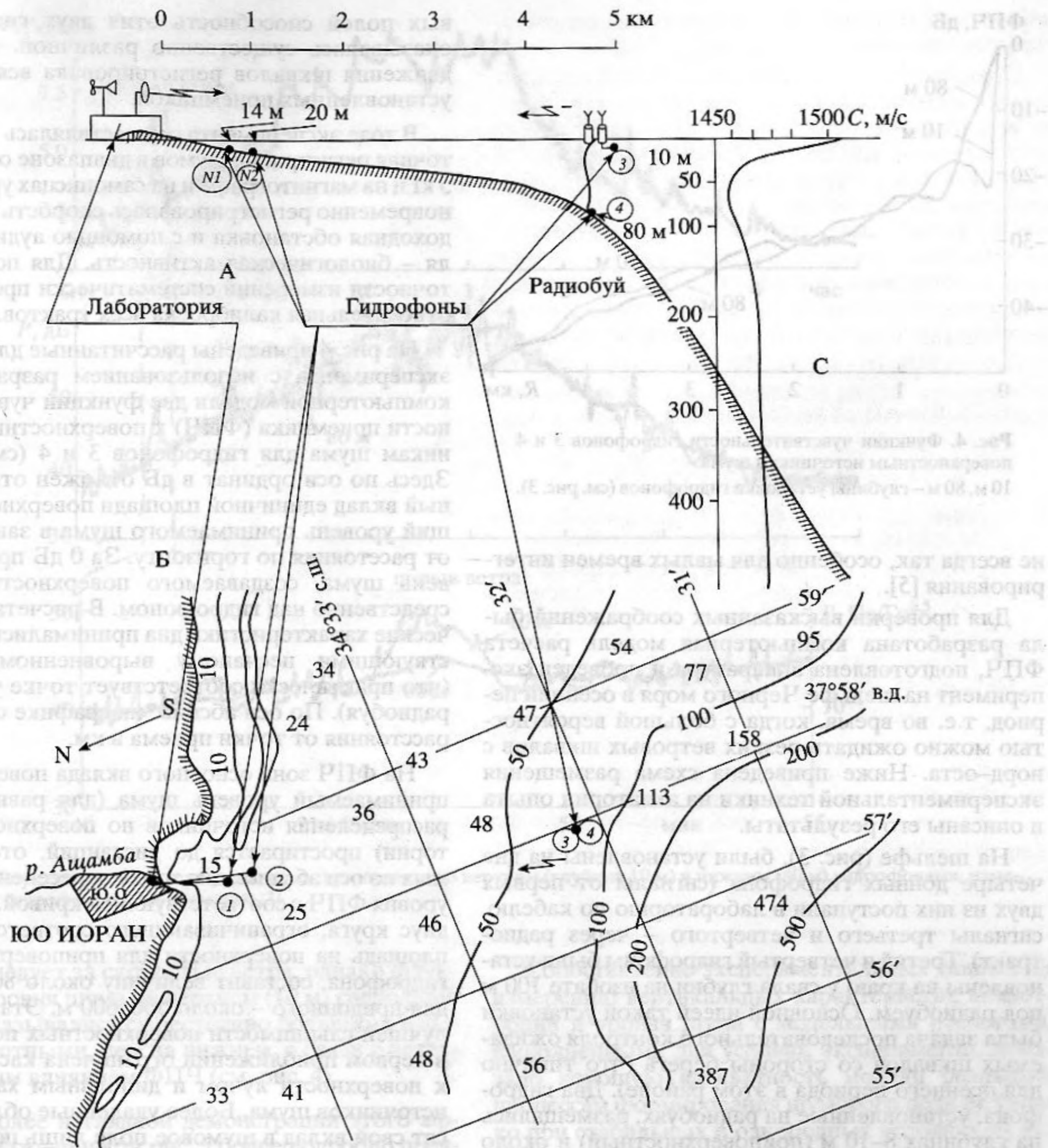


Рис. 3. Профиль дна (А) и карта (Б) места установки гидрофонов на Черноморском шельфе у базы Южного отделения ИО РАН (ЮО); (С) – профиль скорости звука в сентябре.

прохождении над точкой измерения одного шквала зависимость изменчивости уровня шума будет подобна представленной на рис. 2 с той лишь разницей, что левая область графика 1 должна быть отнесена к мелководному гидрофону, а правая 2 – к глубоководному.

Заметим, что, несмотря на то что функция чувствительности гидрофона к поверхностным источникам существенно зависит от глубины наблюдения, спектральные уровни шума (как пока-

зал эксперимент и теоретические оценки для стабильных и однородных условий на шумообразующей акватории) практически не зависят от глубины погружения (или зависят очень слабо). Это, в частности, привело к тому, что авторы большинства работ по исследованию функциональной связи скорости ветра с уровнем шума не указывают глубину приема шума, считая этот параметр несущественным, что на деле (см. рис. 2)

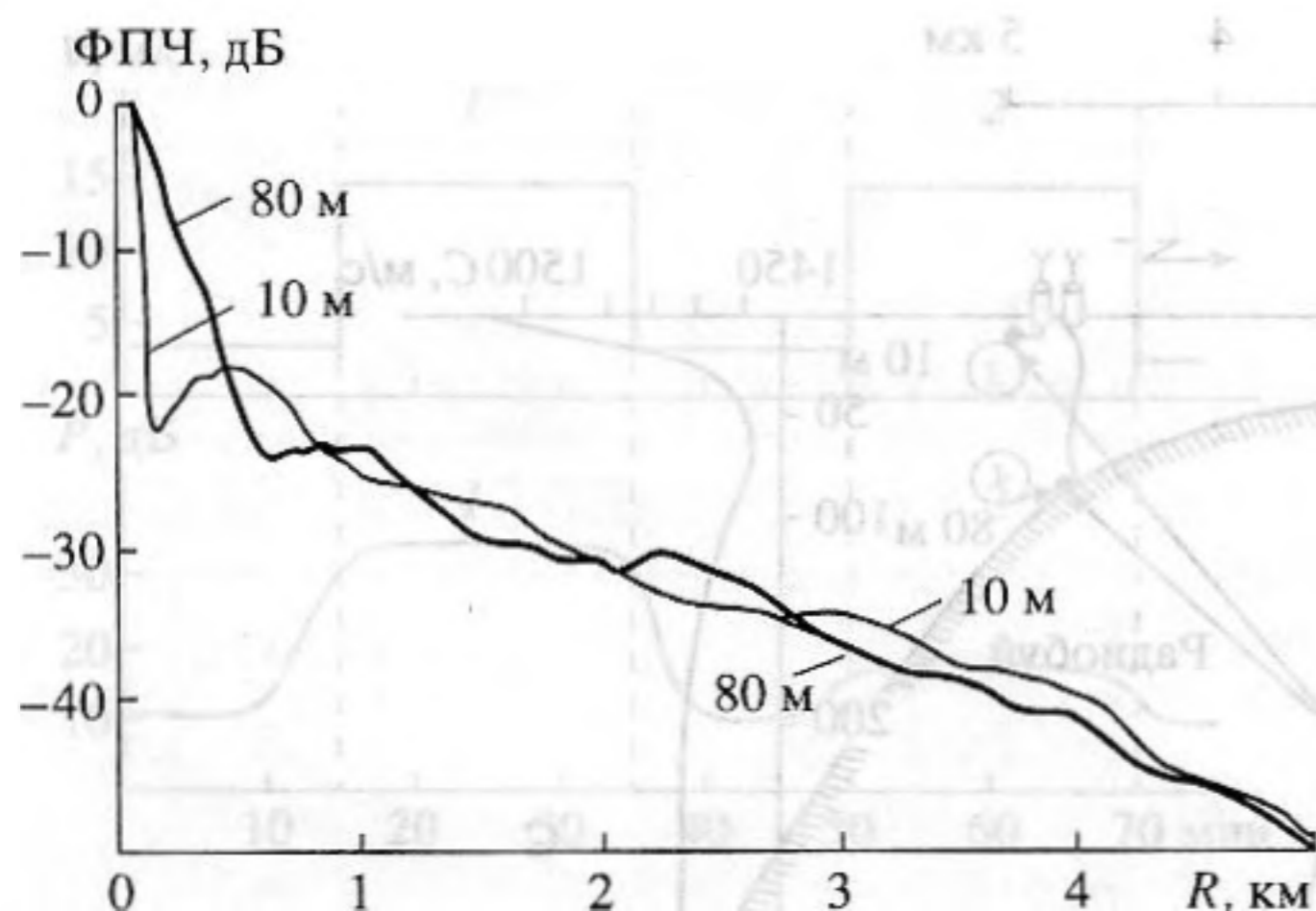


Рис. 4. Функции чувствительности гидрофонов 3 и 4 поверхностным источникам шума.

10 м, 80 м — глубины установки гидрофонов (см. рис. 3).

не всегда так, особенно для малых времен интегрирования [5].

Для проверки высказанных соображений была разработана компьютерная модель расчета ФПЧ, подготовлена аппаратура и проведен эксперимент на шельфе Черного моря в осенний период, т.е. во время, когда с большой вероятностью можно ожидать резких ветровых шквалов с норд-оста. Ниже приведена схема размещения экспериментальной техники на акватории опыта и описаны его результаты.

На шельфе (рис. 3), были установлены на дне четыре донных гидрофона (сигналы от первых двух из них поступали в лабораторию по кабелю, сигналы третьего и четвертого — через радиотракт). Третий и четвертый гидрофоны были установлены на краю у свала глубин на изобате 100 м под радиобуем. Основной идеей такой установки была задача последовательного контроля ожидаемых шквалов со стороны берега (что типично для осеннего периода в этом районе). Два гидрофона, установленные на радиобуях, размещались на глубинах 8–10 м (приповерхностный) и около 80 м (донный). Ожидаемый размер площади поверхности, формирующей шумовое поле для этих гидрофонов, должен был быть существенно различен, а, следовательно, различна степень выраженности флуктуаций шума при прохождении шквала.

Верхний гидрофон находился в однородном приповерхностном слое, и площадь поверхности (с источниками шума), определяющая для него основную энергию шума, составляла примерно 3 га на частотах 3–5 кГц; нижний гидрофон находился на оси подводного звукового канала (см. рис. 3), и для него площадь, определявшая основную энергию, составляла величину около 80–100 га. Таким образом, интегрирующая неоднородности ветро-

вых полей способность этих двух гидрофонов оказывалась существенно различной. Скорость движения шквалов регистрировала вся цепочка установленных приемников.

В ходе эксперимента осуществлялась круглосуточная регистрация шумов в диапазоне от 20 Гц до 5 кГц на магнитографе и на самописцах уровня; одновременно регистрировалась скорость ветра, судходная обстановка и с помощью аудиоконтроля — биологическая активность. Для повышения точности измерений систематически проводилась относительная калибровка всех трактов.

На рис. 4 приведены рассчитанные для условий эксперимента с использованием разработанной компьютерной модели две функции чувствительности приемника (ФПЧ) к поверхностным источникам шума для гидрофонов 3 и 4 (см. рис. 3). Здесь по оси ординат в дБ отложен относительный вклад единичной площади поверхности в общий уровень принимаемого шума в зависимости от расстояния по горизонту. За 0 дБ принят уровень шума, создаваемого поверхностью непосредственно над гидрофоном. В расчетах акустические характеристики дна принимались соответствующими песчаному выровненному грунту (что практически соответствует точке установке радиобуя). По оси абсцисс на графике отложены расстояния от точки приема в км.

На ФПЧ зона основного вклада поверхности в принимаемый уровень шума (для равномерного распределения источников по поверхности акватории) простирается до дистанций, отсчитываемых по оси абсцисс, для точек пересечения — 20 дБ уровня ФПЧ с соответствующей кривой. Тогда радиус круга, ограничивающего соответствующую площадь на поверхности для приповерхностного гидрофона, составит величину около 80–100 м, а для придонного — около 500–600 м. Эта зона наилучшей слышимости поверхностных источников в первом приближении ограничена касательным к поверхности лучом и дипольным характером источников шума. Более удаленные области вносят свой вклад в шумовое поле лишь после отражения излученной ими энергии от дна.

Приведем здесь лишь один фрагмент эксперимента. На рис. 5 вверху показана изменчивость скорости ветра, в средней части рисунка приведена запись изменчивости уровня шума в 1/3-октавной полосе со средней частотой 1 кГц для верхнего и нижнего гидрофонов и временной ход изменчивости скорости ветра над акваторией. Оба графика охватывают период 10 часов. За это время скорость ветра изменилась от почти полного штиля (1–2 м/с) до ветра, достигавшего 10 м/с в отдельных порывах. К утру погода опять стала штилевой. Волнение моря было незначительным, так как ветер дул с берега. На верхних графиках хорошо видно, как уровень шума одно-

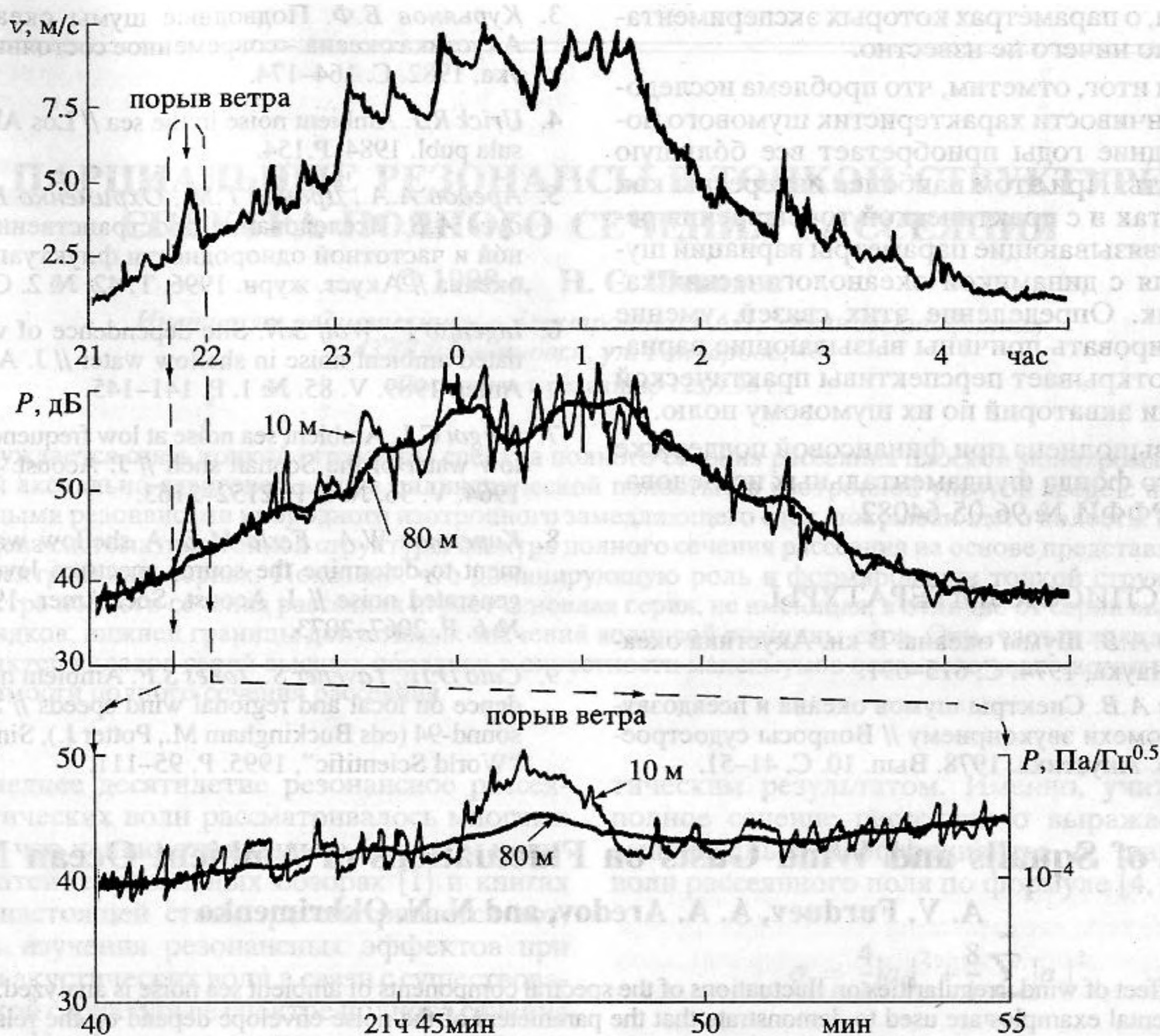


Рис. 5. Флуктуации ветра и уровень шума, принимаемого верхним (глубина 10 м) и нижним (80 м) гидрофонами, измеренные гидрофонами 3 и 4 (см. рис. 3).

значно следует за скоростью ветра, однако флуктуации уровня шума на верхнем (10 м) гидрофоне всегда оказывались существенно большими и высокочастотными, чем на нижнем, в связи с интегрирующим влиянием ФПЧ (см. рис. 4).

Для более наглядной демонстрации этого эффекта в нижней части рис. 5 более подробно представлена реализация временной изменчивости уровня шума на верхнем и нижнем гидрофонах при прохождении отдельного шквала. Настоящий эксперимент качественно подтверждает ранее сделанные расчеты. Следует обратить внимание на идентичность усредненных (за несколько ветровых порывов) уровней шума на разных глубинах, что подтверждает отсутствие глубинной зависимости средних значений спектральных уровней шума. Однако очевидно, что зависимость от глубины погружения характеристик флуктуаций шума существует и определяется соотношением между пространственным масштабом мозаики ветровых полей и размером шумообразующей области поверхности моря, определяемой ФПЧ.

Сопоставление экспериментальных данных по измерению вертикальных характеристик анизотропии и уровня шума с модельными расчетами, выполненными для условий эксперимента, показало хорошую адекватность модели реальным процессам формирования шумового поля не только при стабильных и однородных условиях на акватории, но и при наличии неоднородностей в виде переменного рельефа дна и неравномерного распределения источников шума по поверхности океана. Точность расчетов определяется, главным образом, точностью задания параметров модели. Наилучшее совпадение экспериментальных данных с расчетными оценками наблюдается для лучей, испытывающих донно-поверхностные отражения и собирающих шум со сравнительно небольших акваторий. Для малых углов, под которыми распространяются водно-поверхностные и чисто водные лучи, соответствие расчета и эксперимента нарушается с понижением частоты, так как значительную роль в формировании шумового поля начинают играть весьма удаленные неод-

нородности, о параметрах которых экспериментатору обычно ничего не известно.

Подводя итог, отметим, что проблема исследования изменчивости характеристик шумового поля в последние годы приобретает все большую актуальность. При этом наиболее интересны как с научной, так и с практической точек зрения результаты, связывающие параметры вариаций шумового поля с динамикой океанологических характеристик. Определение этих связей, умение классифицировать причины вызывающие вариации шума, открывает перспективы практической диагностики акваторий по их шумовому полю.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант РФФИ № 96-05-64082.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фурдудев А.В. Шумы океана. В кн. Акустика океана. М.: Наука, 1974. С. 615–691.
2. Фурдудев А.В. Спектры шумов океана и псевдозвуковые помехи звукоприему // Вопросы судостроения. Сер. Акустика. 1978. Вып. 10. С. 41–51.
3. Курьянов Б.Ф. Подводные шумы океана. В кн. Акустика океана – современное состояние. М.: Наука, 1982. С. 164–174.
4. Urick R.J. Ambient noise in the sea // Los Altos, Peninsula publ. 1984. P.154.
5. Аредов А.А., Дронов Г.М., Охрименко Н.Н., Фурдудев А.В. Исследование пространственно-временной и частотной однородности флуктуаций шумов океана // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 2. С. 155–164.
6. Ingenito F., Wolf S.N. Site dependence of wind-dominated ambient noise in shallow water // J. Acoust. Soc. Amer. 1989. V. 85. № 1. P. 141–145.
7. Piggot C.L. Ambient sea noise at low frequencies in shallow water of the Scotian shelf // J. Acoust. Soc. Amer. 1964. V. 36. № 6. P. 2152–2163.
8. Kuperman W.A., Ferla M.E. A shallow water experiment to determine the source spectrum level of wind-generated noise // J. Acoust. Soc. Amer. 1985. V. 77. № 6. P. 2067–2073.
9. Cato D.H., Tavener S., Jones S.F. Ambient noise dependence on local and regional wind speeds // Sea surface sound-94 (eds Buckingham M., Potter J.), Singapore Pab "World Scientific", 1995. P. 95–111.

Effect of Squalls and Wind Gusts on Fluctuations of Ambient Ocean Noise

A. V. Furduev, A. A. Aredov, and N. N. Okhrimenko

The effect of wind irregularities on fluctuations of the spectral components of ambient sea noise is analyzed. Experimental examples are used to demonstrate that the parameters of the noise envelope depend on the relation between the spatial scales of wind disturbances and the size of the hydrophonically covered region on the sea surface. A convenient noise-field modeling concept of a radial function of hydrophone sensitivity to distributed surface dipole noise sources is introduced. This hydrophone surface sensitivity function (SSF) depends on the sound velocity profile, hydrophone submersion depth, frequency dependent absorption in the medium, the bottom reflectivity, and the scattering of sound in the bulk and from the boundaries of the waveguide. The characteristics of noise fluctuations are determined by convolving the SSF with a moving mosaic of wind gusts. It is demonstrated that the SSF integrates small-scale wind gusts and the dimension of the averaged surface fluctuations of wind speed are greater the deeper the hydrophone. Experimental results proved the adequacy of the noise field fluctuation model built around the SSF. It is demonstrated that the wind speed, locally measured above the point of sound measurement, need not always define the level of noise and parameters of its fluctuations.