АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 37 1991 Вып. 2

УДК 537.591.1

© 1991 г.

М. В. Куликов, И. Е. Лбов, А. Ю. Медведев, А. В. Павленко, А. А. Петрухин, М. Ю. Толстой, В. В. Шестаков, Л. Е. Щукин

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ В ГОРНЫХ ОЗЕРАХ

Приводятся экспериментальные результаты по исследованию спектральных и статистических характеристик акустических шумов горных озер в частотном диапазоне сигналов, генерируемых каскадами частиц высоких энергий в воде.

Возможность регистрации акустического излучения ионизирующих частиц в конденсированных средах предсказана еще в 1957 г. [1]. Однако малый коэффициент трансформации энергии частиц в звуковую делает практически нереальным детектирование одиночных частиц. Единственная возможность реализации метода связана с регистрацией мощных каскадных ливней или пучков, содержащих большое число частиц [2].

В связи с разработкой проектов глубоководных детекторов мюонов и нейтрино (ДЮМАНД) было предложено [3] использовать акустический метод для регистрации каскадных ливней, генерируемых космическими нейтрино в глубинах океана. Однако большие неопределенности в оценках возможности существования источников нейтрино сверхвысоких энергий, а также необходимость создания сразу крупномасштабной установки породили известный пессимизм в отношении акустического варианта проекта ДЮМАНД.

Более реалистическим представляется использование акустического метода для регистрации стволов широких атмосферных ливней (ШАЛ) высоких энергий в горных озерах [4]. При этом установка должна располагаться на небольших глубинах, а оценки ожидаемой скорости счета свидетельствуют о возможности практической реализации метода. Для определения порога акустической регистрации ШАЛ необходимы систематические исследования шумов горных озер, которые ранее не проводились.

В данной работе основное внимание было обращено на изучение спектральных и статистических характеристик шумов в полосе частот 2—50 кГц, так как ожидаемый сигнал широкополосен, определение нижних пределов интервалов стационарности, а также характеристик наиболее важных с точки зрения разработки методов выделения полезных событий — авторреляционной функции и распределения мгновенных значений.

Измерения проводились с помощью шумомера, представленного на рис. 1. Шумомер состоит из гидрофона *1*, экрана *2* для защиты от электромагнитных наводок, герметичного корпуса *3*, встроенного низкошумящего предусилителя (ПУ) *4*. По электрическому кабелю *5* длиной около 30 м подводилось питание на ПУ и передавался сигнал, который записывался на высокочастотный измерительный магнитофон 7006F фирмы «Брюль и Къер» (40 Гц — 60 кГц). Использовались два типа гидрофонов со следующими характеристиками: резонансная частота $f_{рез}$=29,5 и 44 кГц, входная емкость датчика $C_д$=884 и 420 пФ, тангенс диэлектрических потерь tg δ=2 и 1,3% соответственно.

Для измерения штилевых шумов собственный эквивалентный акустический шум шумомера должен быть ниже нижнего предела Венца [5].

Стремление минимизировать шумы аппаратуры в области звуковых и ультразвуковых частот требует обеспечения возможно более низких шумов ПУ даже при использовании гидрофонов с высокой чувствительностью порядка 1 мВ/Па. При разработке аппаратуры использован метод снижения шумов ПУ за счет параллельного включения полевых транзисторов (ПТ) во входном каскаде [6]. Наряду с минимизацией шумов ПТ обеспечивают большое входное сопротивление. Схема предусилителя и спектральные плотности шумов для различных входных каскадов приведены в работе [7].

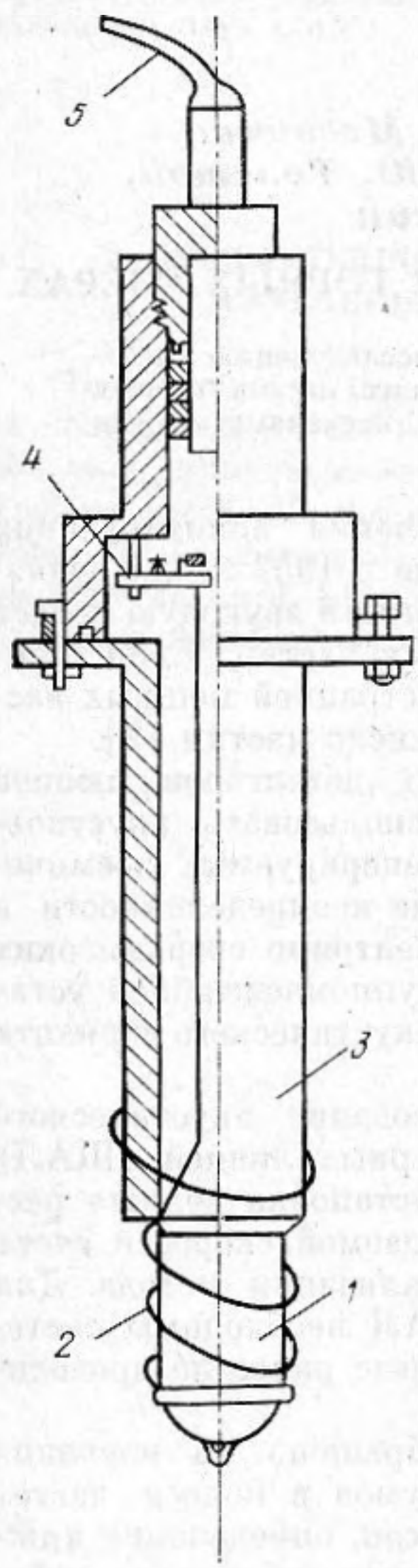

Рис. 1. Шумомер

Калибровка гидрофонов производилась сочетанием импедансного метода [8] и метода замещения в импульсном режиме [9] в объеме (1,5×1,5×3,2) м^3. Точность абсолютной калибровки составляла 1 дБ. Зависимость чувствительности 1-го гидрофона и соответствующего шумомера от частоты представлена на рис. 2. На рис. 3 приведены спектральные плотности шумов акустически заглушенного прибора. Измерения проводились как в лабораторных условиях, так и при работе в естественных водоемах. Собственный шум определяется тепловым шумом гидрофонов. Возрастание плотности шумов наблюдается вблизи их резонансных частот. Отношение частот гидрофона к шумам ПУ превышает 10 дБ во всем рабочем диапазоне частот. На рис. 3 для сравнения представлены также шумовые характеристики других приборов, используемых в подобных измерениях.

В период 1987—1988 гг. последовательно были выполнены измерения акустических шумов в горных озерах Иссык-Куль (1609 м над уровнем моря, площадь 6200 км^2) и Севан (1898 м, 1235 км^2), а в предыдущие два года — калибровочные измерения в Клязьминском водохранилище (уровень моря, 1,2×15 км^2) и в озере Сёв-Лич (3192 м, 250×300 м^2).

Регистрирующая аппаратура размещалась на лодке, удаленной от прибора на расстоянии более 10 м. При измерениях на Клязьминском водохранилище аппаратура размещалась на берегу. Прибор удалялся на 30—40 м от береговой линии. Контроль шумов производился одновременно с записью — на слух, через монитор магнитофона, что позволяло эффективно обнаруживать появление электромагнитных и других помех.

Измерения в озерах Иссык-Куль и Севан проводились на глубинах 5—10 м, что соответствует положению максимума каскада, генерированного в воде стволом ШАЛ. Удаленность от берега — 300÷500 м. Глубина в месте измерений — 10÷30 м.

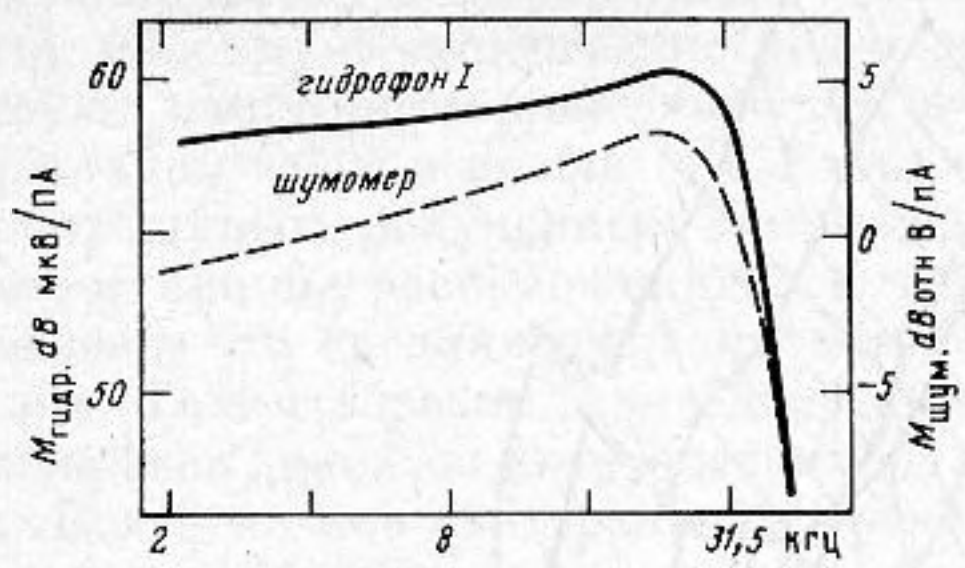

Рис. 2

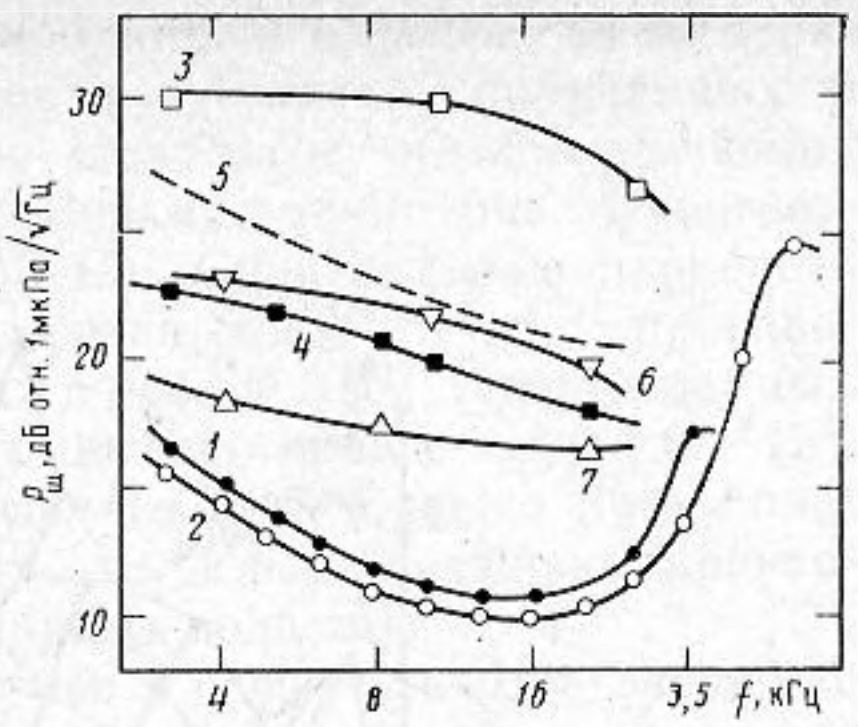

Рис. 3

Рис. 2. Чувствительность гидрофона *1* и соответствующего шумомера

Рис. 3. Спектральные плотности шумов аппаратуры: *1* – шумомер (гидрофон *1*); *2* – шумомер (гидрофон *2*); *3* – работа [18]; *4* – работа [5]; *5* – гидрофон 8101 B&K; *6* – работа [19]; *7* – работа [20]

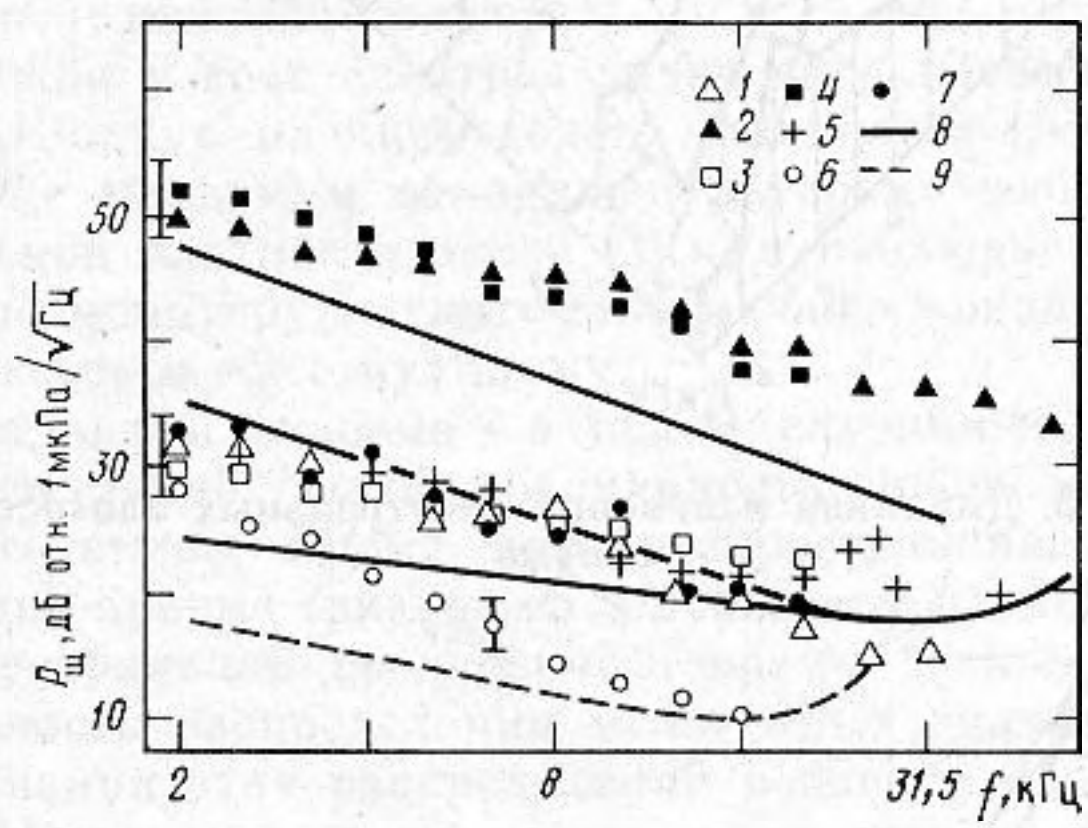

Рис. 4. Спектральные плотности акустических шумов водоемов. Оз. Иссык-Куль: *1* – штиль, *2* – ветер (V=5 м/с); оз. Севан: *3* – штиль, *4* – ветер (V=5 м/с); Клязьминское водохранилище; *5* – штиль; оз. Сёв-Лич: *6* – штиль, *7* – ветер (V=4 м/с); *8* – работа [5]; *9* – шум аппаратуры (шумомер)

Для рабочего диапазона частот основной вклад дают динамические шумы, вызываемые поверхностным волнением, связанным с движением воздушных масс над акваторией [10]. Поэтому измерения проводились в широком диапазоне метеоусловий — от полного штиля до грозы.

Частотный анализ акустических шумов производился узкополосным анализатором спектра типа 2033 фирмы «Брюль и Къер» (разрешение по частоте 12,5 Гц). Продолжительность записи каждого спектра превышала 1,3 с, что определяется приемлемой, порядка 10%, точностью измерения спектральных плотностей.

Полученные результаты представлены на рис. 4. Для сравнения на графике приведены кривые, соответствующие нижнему пределу Венца и спектральным плотностям шумов океана [5] при различных скоростях ветра V. Спектр, измеренный в Клязьминском водохранилище, соответствует пиковой высоте волн 3—5 см. Измерения проводились ночью, когда техническая активность минимальна. В диапазоне 2—16 кГц спектральные плотности лежат ниже прямой, соответствующей скорости ветра

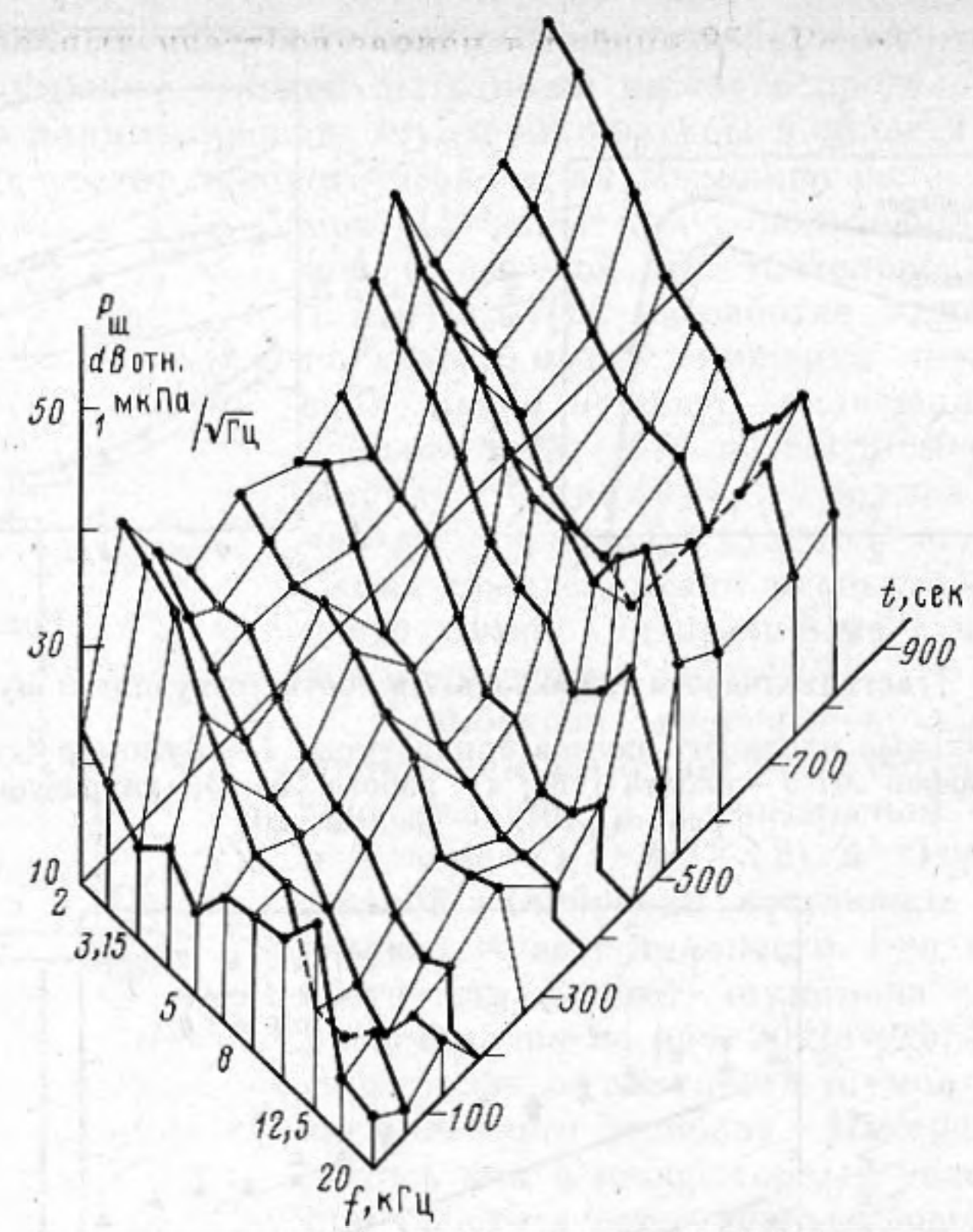

Рис. 5. Динамика изменений спектральных плотностей шума

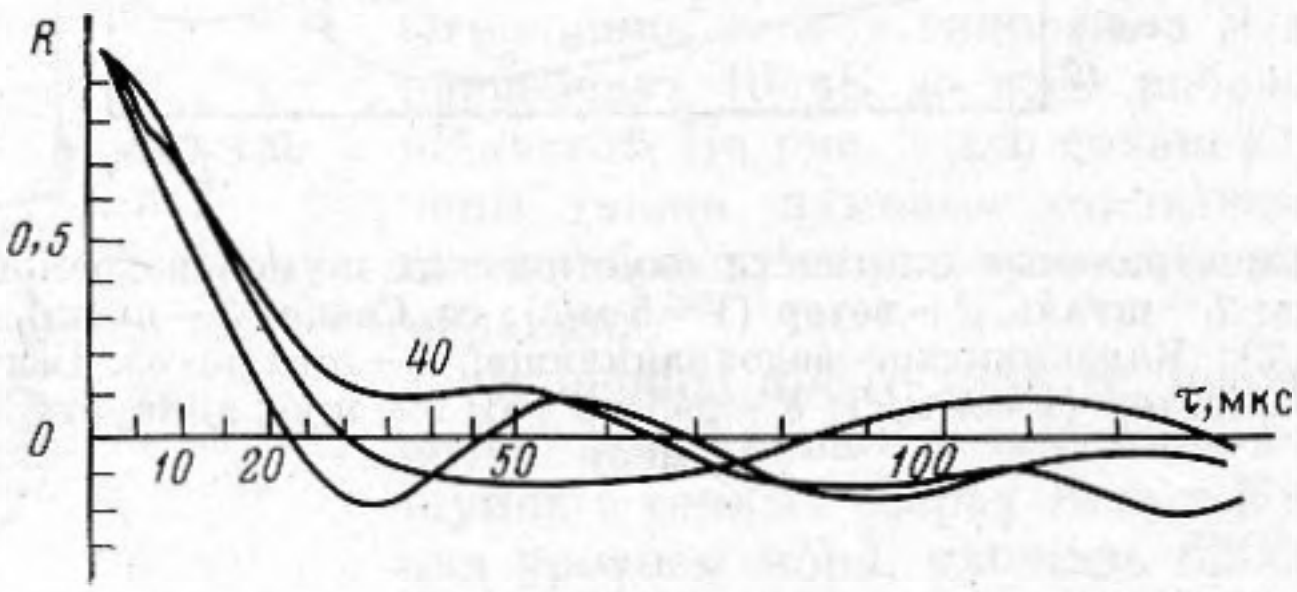

Рис. 6. Вид функций автокорреляции акустических шумов. Диапазон частот 2–50 кГц

2,5 м/с. Для частот 16–40 кГц спектр уполаживается. В диапазоне от 24 до 25 кГц имеется максимум, который определяется импульсами длительностью 200–400 мкс, амплитудой до 10 среднеквадратичных значений. Частота появления таких импульсов порядка 1–2 Гц, форма близка к акустическому сигналу от схлопывающегося микропузырька. Спектры шумов озера Сёв-Лич измерялись при полном штиле и скорости ветра 4 м/с. Минимальные значения шумов получены геометрическим вычитанием шумов аппаратуры из измеренных значений. Они лежат ниже нижнего предела Венца. Спектральные плотности, соответствующие штилю в Клязьминском водохранилище, озерах Иссык-Куль и Севан, практически совпадают. Вертикальным отрезком показан разброс типичных кривых, соответствующий колебаниям шума при неизменных погодных ус-

ловиях (см. ниже). Для отдельных участков записи в районе 25 кГц наблюдается узкий максимум. В отличие от результатов, полученных в Клязьминском водохранилище, появление импульсов, обусловливающих этот максимум, существенно более редко. Верхние точки рис. 4 соответствуют измерениям при скоростях ветра 5 м/с. Спектральные плотности при таком ветре и штиле ($V<1$ м/с) соотносятся как $V^{3/2}$, что не противоречит данным, полученным при измерениях в океане [10]. Анализ данных метеостанций, расположенных в районах высокогорных озер [11—13], показал, что средняя скорость ветра составляет 2—3 и редко превышает 5 м/с. Таким образом, приведенные на рис. 4 кривые описывают практически весь диапазон акустических шумов горных водоемов.

Более низкие спектральные уровни шумов в озере Сёв-Лич, очевидно, являются следствием его малых размеров, так как в больших водоемах в формировании шумового поля в данной точке для полосы частот 2—50 кГц участвует акватория, превышающая размеры указанного озера.

Рис. 5 характеризует динамику изменений спектральных плотностей в течение 15 мин при переходе от полного штиля до грозы: 0—300 сек.— полный штиль; с 380-й начинается слабый дождь, который постепенно усиливается; на 700-й дождь еще более усиливается, резко усиливается ветер (до 7—10 м/с), начинается гроза.

До начала дождя у всех спектров виден спад к высоким частотам со скоростью 4—6 дБ/окт. С началом дождя появляется максимум в области 16 кГц. Такой же максимум обнаружен авторами работы [17]. Возрастание спектральной плотности около 16 кГц наблюдалось и при слабом ветре. На слух по монитору магнитофона начало дождя проявляется как переход от «розового» к «белому» шуму.

Шум в естественном водоеме — в целом случайный, нестационарный процесс. Он представляет собой совокупность полей многих отдельных независимых источников. Кроме того, распространение звука от этих источников к точке приема связано со множеством случайных искажений. На основании центральной предельной теоремы можно, однако, предположить нормальность распределения мгновенных значений. Экспериментальные исследования этих распределений в океане проводились авторами работ [14—16].

Данные, полученные на Клязьминском водохранилище, анализировались в полосе 2—40 кГц, озера Сёв-Лич — в полосе 2—20 кГц, так как во втором случае минимальные спектральные плотности для больших частот сравниваются с шумами аппаратуры. Частота дискриминации составляла 0,5—1 кГц, что обеспечивает независимость отсчетов. Это подтверждается видом функции автокорреляции (рис. 6). Объем выборок — $(5—6)\cdot 10^3$ отсчетов. Проверка гипотезы о законе распределения проводилась по критерию Пирсона [21]. Экспериментальные данные аппроксимировались функцией вида

$$P_a^x=(S/\sigma\sqrt{2\pi})\exp[-(x-\bar{x})^2/2\sigma^2],$$

где S — суммарное количество отсчетов; σ — стандартное отклонение; x — номер канала, а $\bar{x}$ — номер канала со средней скоростью счета.

Методом наискорейшего спуска [22] минимизировалась величина

$$Y=\sum_{x=1}^{n}(P_э^x-P_a^x)/P_э^x$$

по параметрам S, x, σ ($P_э^x$ и P_a^x — соответственно экспериментально и теоретически оцененные количества отсчетов в каналах). В качестве исход-

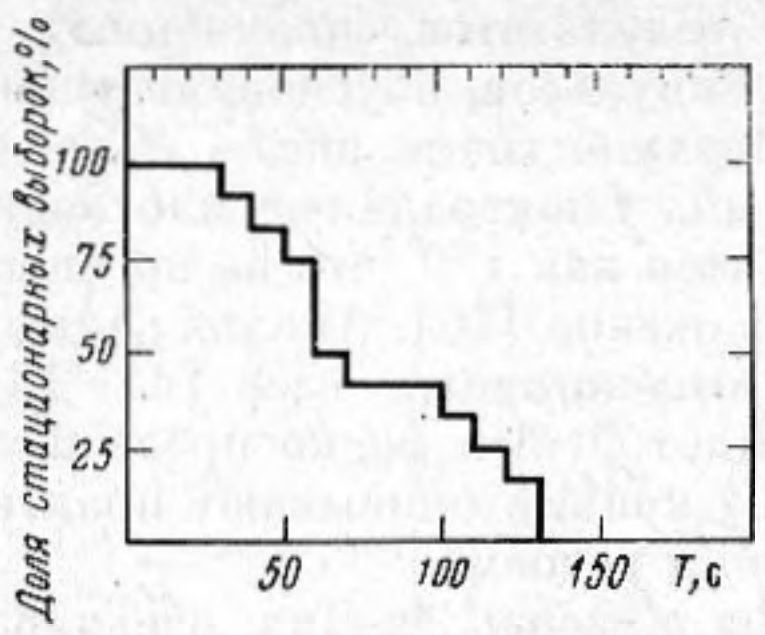

Рис. 7. Зависимость стационарности шумовой выборки от ее длительности

ных значений S, x, σ брались их выборочные оценки. На уровне значимости $\alpha=0{,}05-74$ и 87% выборок не противоречат гипотезе о нормальности распределения мгновенных значений в случае озера Сёв-Лич и Клязьминского водохранилища, соответственно. Анализ распределений проводился в диапазоне $\pm 3\sigma$, что определялось разрядностью использованного АЦП. На «хвостах» распределений дают определенный вклад редкие импульсы с большой амплитудой. В основном это импульсы трех типов: двух-трех полупериодные импульсы с передней полуволной, как правило, разрежения; импульсы вида затухающего автоколебания; длинные (до 1,5 мс) сигналы с формой, близкой к радиоимпульсу. Частота их следования зависит от формы импульсов и от водоема. В случае Клязьминского водохранилища она самая большая и составляет 0,1—2 Гц. В отдельных измерениях наблюдались импульсы, по форме близкие биполярному импульсу, ожидаемому от каскадных ливней [3]. Частота их следования сильно флуктуирует, но не превышает 0,1 Гц.

Время первого пересечения нуля автокорреляционной функции (см. рис. 6) определяется верхней частотой рабочей полосы и равно $0{,}5/(Kf_в)$, где $K=0{,}7-1$. Вычисление функции автокорреляции производилось по данным, полученным при штилевых метеоусловиях. Спектры, соответствующие этим измерениям, подобны изображенным на рис. 4. Несмотря на большую разницу в спектральных плотностях на нижней и верхней границах частотного диапазона, определяющими являются высокочастотные случайные составляющие.

Реализация методов выделения полезных событий во многом зависит от изменчивости шума во времени. Нестационарность шума приводит не только к существенному усложнению методик, но и снижению их эффективности.

Для исследования стационарности последовательные выборки статистически независимых отсчетов шума проверялись на принадлежность их к одной генеральной совокупности. Производился анализ как участков с изменяющимися, так и со стабильными погодными условиями.

Для выборок $(x_1, \ldots, x_{n_1})$, $(y_1, \ldots, y_{n_2})$, (n_1, n_2— число независимых отсчетов) гипотеза H_0 о принадлежности одной генеральной совокупности может быть проверена по критерию Колмогорова — Смирнова [22]. Использована статистика

$$D_{n_1,n_2} = \max_{-\infty<x<\infty} [F_{n_1}(x) - G_{n_2}(x)],$$

где F_{n_1}, G_{n_2}— эмпирические функции распределения. При стремлении среднего геометрического $n_1 n_2/\sqrt{n_1 \cdot n_2}$ к бесконечности функция распределения величины

$$\sqrt{n_1 \cdot n_2/(n_1+n_2)}\, D_{n_1,n_2}$$

сходится к функции Колмогорова. Если при уровне значимости α, $D_{n_1,n_2} > \sqrt{n_1 \cdot n_2/(n_1+n_2)}\, K_{1-\alpha}$, то H_0 отвергается. Здесь $K_{1-\alpha}$— квантили порядка $(1-\alpha)$ распределения Колмогорова ($K_{1-0,05}=1{,}358$; $K_{1-0,1}=1{,}628$). Этот критерий применялся к выборкам, набранным в последовательные моменты времени ($T_{выб}=10$ с). Результаты измерения интервалов стационарности приведены на рис. 7 в виде распределения количества последователь-

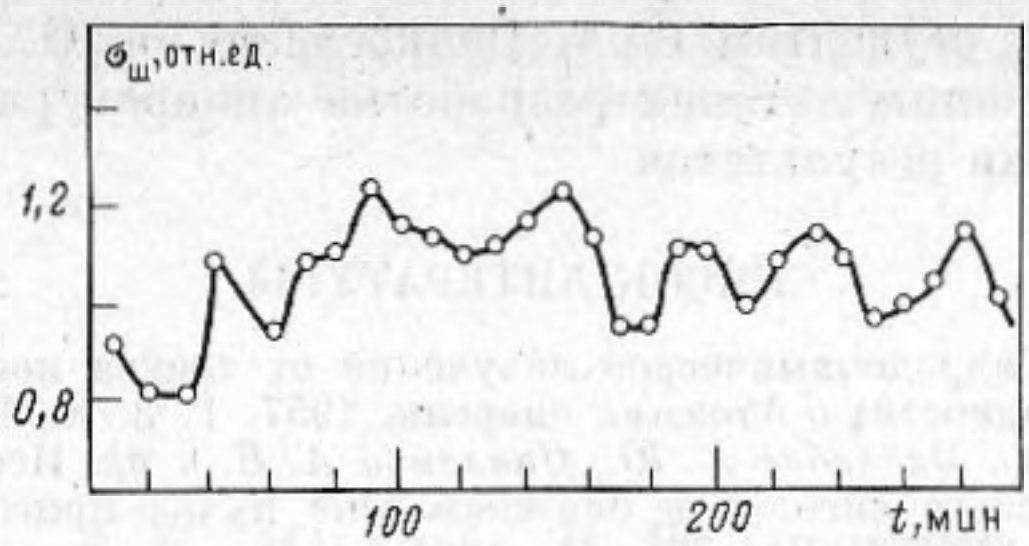

Рис. 8. Изменение σ шума во времени

ных выборок, удовлетворяющих упомянутому выше критерию при $\alpha=0{,}05$. Видно, что для $T>30$ с шум нестационарен. Для интервалов $T=30$ с подтверждается стационарность для всех выборок. Это существенно превышает интервал, в течение которого полезный сигнал распространяется до наиболее удаленных приемников в зоне эффективной регистрации ($\tau\leqslant 2$ с). Длительность наиболее продолжительных стационарных участков достигает нескольких минут. Вид распределения по длительностям стационарных участков, в основном, определяется динамикой изменения погодных условий.

При нормальном распределении мгновенных значений с нулевым средним стандартное отклонение σ полностью описывает процесс и характеризует его изменение во времени. На рис. 8 приведена зависимость σ от времени для случая стабильных метеоусловий. Анализ таких зависимостей, соответствующих различным измерениям, показал, что средние и максимальные изменения не превышают 0,06 и 2% $с^{-1}$ соответственно. В случае стабильных метеоусловий колебания за длительные промежутки времени составляют 20—30%.

В заключение кратко сформулируем основные результаты работы.

Разработана низкошумящая аппаратура для регистрации акустических шумов, собственный шум которой определяется тепловыми шумами используемых гидрофонов. Данная аппаратура может быть применена в качестве приемников в разрабатываемых системах регистрации космических лучей предельно высоких энергий, при использовании гидрофонов с $f_{рез}\geqslant$ $\geqslant 70$ кГц.

Впервые получены экспериментальные данные относительно спектральной плотности акустических шумов в горных озерах в диапазоне частот 2—50 кГц, соответствующему сигналам, генерируемым каскадами частиц высоких энергий в воде. Уровни шумов определяются метеорологической обстановкой над акваторией и для больших озер согласуются с результатами подобных измерений в океане [10]. Полученные данные с учетом спектрального состава исследуемых сигналов могут быть положены в основу определения акустического фона при регистрации космических частиц и стволов ШАЛ предельно высоких энергий.

Экспериментально обнаруженные в интересующей области частот нормальность распределения мгновенных значений шумов и их стационарность (однородность) на значительных по сравнению со временем распространения полезных сигналов интервалах времени позволяют использовать корреляционные методы шумоподавления и выделения однократных полезных сигналов для случая стационарного шума. Обнаруженная малая длительность интервала корреляции позволяет распространить использование этих методов на случай коротких однократных импульсов.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность сотрудникам Ереванского физического института и Казахского государственного университета за помощь в организации и проведении измерений в вы-

сокогорных озерах; студентам В. А. Волкогонову и О. В. Григорьеву за помощь на определенных этапах разработки аппаратуры, проведения измерений и обработки результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аскарьян Г. А.* Гидродинамическое излучение от треков ионизирующих частиц в стабильных жидкостях // Атомная энергия. 1957. Т. 3. № 8. С. 152–153.
2. *Данильченко И. А., Медведев А. Ю., Павленко А. В. и др.* Исследование характеристик акустического сигнала в ближней зоне пучка протонов в воде // Акуст журн. 1985. Т. 31. № 5. С. 706–708.
3. *Ascarijan G. A., Dolgoshein B. A., Kalinovsky A. N., Mokhov N. V.* Acoustic detection of high energy particle showers in water // Nucl. Inst. and Meth. 1979. V. 164. N 2. P. 267–278.
4. *Петрухин А. А.* Большие водные детекторы в физике элементарных частиц // Исследование мюонов и нейтрино в больших водных объемах. Алма-Ата: КазГУ, 1983. С. 3–16.
5. *Wenz G. M.* Acoustic ambient noise in ocean: spectra and sources // JASA. 1962. V. 34. P. 1936–1956.
6. *Нетцер И.* Проектирование низкошумящих предусилителей // ТИИЭР. 1981. Т. 69. № 3. С. 58–74.
7. *Куликов М. В., Лбов И. Е., Медведев А. Ю. и др.* Исследование акустических шумов в горных озерах // Препринт № 050-89. М.: МИФИ, 1989.
8. *Павлов Л. Е., Сильвестров С. В.* Измерение и контроль чувствительности пьезопреобразователей на низких частотах // Измерительная техника. 1979. № 11. С. 68–69.
9. *Боббер Р. Дж.* Гидроакустические измерения. М.: Мир, 1974.
10. *Фурдуев А. В.* Шумы океана // Акустика океана. М.: Наука, 1974.
11. Атлас ГССР. Тбилиси – Москва: 1964.
12. Атлас АрмССР. Ереван – Москва: 1961.
13. Атлас ТаджССР. Душанбе – Москва: 1968.
14. *Green A. N.* A study of bivariate distribution of ocean noise // Bell Teleph. Lab. Inc., Techn. Rep. 1962. N 10, 11.
15. *Arase T., Arase E. M.* Deep-sea ambient-noise statistics // JASA. 1968. V. 44. N 6. P. 1979–1984.
16. *Urushihara K., Abe R., Etoh K.* Some properties of ambient noise in the Sagami-Bay area // Proc. 6th Int. Cong. on Acoustics. 1969. V. 4. Pl. 2–4.
17. *Nustuen J. A.* Rainfall measurements using underwater ambient noise // JASA. 1986. V. 79. N 4. P. 972–982.
18. *Gao Xiaoyu, Liu Yongyue, Du Songlin.* Acoustic detection of air showers cores // Proc. 19th Int. Cosmic Ray Conf. 1985. V. 8. P. 333–336.
19. *Sulak L., Armstrong T., Baranger M. et al.* Experimental studies of the acoustic signature of proton beams traversing fluid media // Nucl. Inst. and Meth. 1979. V. 161. N 2. P. 203–207.
20. *Henriquez T. A.* An extended-range hydrophone for measuring ocean noise // JASA. 1972. V. 52. N 5 (pt 2). P. 1450–1455.
21. *Байшев А. Н.* Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983.
22. *Бахвалов Н. С.* Численные методы. 2-е изд. М.: Наука, 1975.

Московский инженерно-физический институт

Поступила в редакцию 19.06.90

M. V. Kulikov, I. E. Lbov, A. Yu. Medvedev, A. V. Pavlenko, A. A. Petrukhin, M. Yu. Tolstoi, V. V. Shestakov, L. E. Shukin

INVESTIGATION OF ACOUSTIC NOISE IN MOUNTAIN LAKES

Results of the experimental investigations of the spectral and statistical characteristics of acoustic noise of mountain lakes in the frequency range of the signals generating by the cascades of the high-energy particles in water are cited.