

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,  
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 551.501.796+551.508.99

**ИНФРАЗВУКОВЫЕ СТАНЦИИ КИЗ ДЛЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ И МОНИТОРИНГА**

© 2020 г. В. Н. Иванов<sup>а</sup>, Ю. С. Русаков<sup>а,\*,\*\*</sup>

<sup>а</sup> НПО “Тайфун”, Институт экспериментальной метеорологии,  
Россия, 249038, Обнинск Калужской обл., ул. Победы, 4

\*e-mail: rusakov@rpatyphoon.ru

\*\*e-mail: yurusakov@mail.ru

Поступила в редакцию 06.02.2020 г.

После доработки 13.02.2020 г.

Принята к публикации 15.02.2020 г.

Описаны инфразвуковые станции КИЗ (комплекс инфразвуковой), созданные в НПО “Тайфун” (г. Обнинск) и автономно работающие на протяжении ряда лет в нескольких пунктах РФ. Практически все элементы станций: конфигурация, микробарометры, ветровые фильтры, система сбора и передачи данных, аппаратный бокс и т.п. — разработаны с учетом опыта создания и эксплуатации подобных систем, прежде всего, инфразвукового компонента международной системы мониторинга ядерных испытаний. Основными достоинствами инфразвуковых станций, наряду с хорошими и стабильными метрологическими характеристиками, являются: сравнительно низкая стоимость, минимальные эксплуатационные затраты, надежность работы в широком диапазоне погодных условий, простота поверки и калибровки. Инфразвуковые станции КИЗ адаптированы к условиям эксплуатации на территории типовой метеостанции РФ.

DOI: 10.31857/S0032816220040138

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Инфразвуковая станция осуществляет высокочувствительную синхронную регистрацию пульсаций приземного атмосферного давления в нескольких разнесенных пунктах с целью последующего выделения и оценки параметров направленных инфразвуковых волн на фоне ветровых и акустических шумов. Известны десятки природных и техногенных явлений, излучающих заметный инфразвук [1]. Инфразвуковые волны с частотами порядка и менее 1 Гц слабо поглощаются в нижнем 100-километровом слое атмосферы [2] и благодаря сильной температурно-ветровой рефракции распространяются на многие сотни и тысячи километров вдоль земной поверхности, обеспечивая информацией инфразвуковой мониторинг в пункте наблюдения.

В настоящее время прикладной интерес к данным инфразвукового мониторинга развивается по четырем основным направлениям.

Во-первых, это локализация и идентификация удаленных техногенных источников инфразвука, прежде всего, ядерных взрывов. В рамках реализации этого направления развернута международная сеть, включающая 60 инфразвуковых станций (в том числе 4 станции на территории РФ), для кон-

троля выполнения Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний [3].

Во-вторых, это диагноз и прогноз опасных природных явлений: гроз, смерчей, землетрясений, лавин, газогидратных выбросов и т.п. [4, 5].

Третье направление — инфразвуковые исследования извержений вулканов, падений метеоритов, ионосферных возмущений, деструкции ледников и т.п. [6–8].

Наиболее перспективно четвертое направление — томография температурной и ветровой структуры атмосферы в области высот от 30 до 100 км по данным наземной сети инфразвуковых станций [9–11].

Таким образом, потребность в надежных и сравнительно недорогих технических средствах инфразвукового мониторинга атмосферы будет возрастать. В случае практической реализации инфразвуковой томографии эта потребность может стать существенной, поскольку число инфразвуковых станций, необходимое только для охвата территории РФ, скорее всего, составит несколько сотен.



**Рис. 1.** Фотография всепогодного антивандального приборного шкафа в п. Начики (Камчатка) с пятью микробарометрами, системой воздуховодов для локальной сверки/калибровки микробарометров и подключения ветровых фильтров, многоканальным блоком оцифровки и передачи данных на удаленный сервер.

## 2. РАЗРАБОТКА ИНФРАЗВУКОВОЙ СТАНЦИИ

Инфразвуковой мониторинг основан на совместном использовании аппаратных и программных средств. Аппаратное средство в данном случае — это комплекс для мониторинга инфразвуковых волн КИЗ, входящий в состав станции геофизического мониторинга [12] и выполняющий функции полноценной инфразвуковой станции.

Комплекс для мониторинга инфразвуковых волн КИЗ имеет геофизическую направленность, достаточно высокую чувствительность к инфразвуковым пульсациям приземного давления и рабочий диапазон частот 0.005–10 Гц. Такие комплексы созданы в НПО «Тайфун» Росгидромета, развернуты в шести пунктах РФ и автономно функционируют с 2015 г. в режиме опытной эксплуатации и проведения атмосферных исследований.

В качестве технического прототипа КИЗ использована инфразвуковая станция МСМ (международной системы мониторинга), модернизация которой осуществляется в течение последних 20 лет [3]. Несмотря на то что инфразвуковые станции МСМ имеют иное предназначение, чем станции КИЗ, принцип их работы и условия эксплуатации, перечень основных компонентов и предъявляемые требования в целом идентичны.

Основные компоненты инфразвуковых станций — это группа разнесенных на местности ветровых фильтров (воздухозаборников), синхронизированные между собой датчики пульсаций дав-

ления (микробарометры) и система оцифровки, сбора и передачи данных. Кроме того, в состав инфразвуковых станций входят средства энергопитания, метрологического контроля и защиты оборудования от внешних воздействий. Отличие инфразвуковых станций КИЗ от станций МСМ состоит в том, что все компоненты КИЗ, а также его конфигурация заново разработаны или существенно модифицированы.

Основные требования к инфразвуковым станциям МСМ следующие: рабочий диапазон частот 0.02–4 Гц; приведенный уровень собственных шумов в этой полосе частот  $\leq 2$  мПа; спектральная плотность собственных шумов на частоте 1 Гц  $\leq 0.4$  мПа<sup>2</sup>/Гц; минимальное число пунктов измерения пульсаций давления 4; погрешность синхронизации измерений  $\leq 1$  мс [13]. Очевидно, что инфразвуковая станция должна быть работоспособной при любых погодных и иных условиях в пункте наблюдения, иметь стабильные метрологические характеристики, которые должны регулярно проверяться. Первостепенными являются также вопросы стоимости инфразвуковых станций и эксплуатационных затрат. С точки зрения наблюдения указанных параметров и характеристик проведем сравнение описанных ниже инфразвуковых станций КИЗ со станциями МСМ.

### 2.1. Конфигурация станции и геометрия инфразвуковой группы

Принципиальной особенностью КИЗ является размещение всего оборудования, за исключением ветровых фильтров, источника питания и сервера, в едином приборном шкафу (рис. 1). Распределенные по территории инфразвуковой станции ветровые фильтры соединены с микробарометрами жесткими длинными воздуховодами.

При такой конфигурации инфразвуковой станции не требуется размещения в месте расположения каждого ветрового фильтра следующих устройств: микробарометра, системы сбора и передачи данных, защиты от несанкционированного доступа и погодных воздействий, электропитания, как это принято на типовой инфразвуковой станции МСМ.

Коренным образом упрощается контроль идентичности фазовых (ф.ч.х.) и частотных (а.ч.х.) характеристик микробарометров, входящих в единую инфразвуковую группу. Очевидно, что резко снижаются затраты на изготовление инфразвуковой станции и, главное, на ее обслуживание.

Еще одной особенностью КИЗ является 5-элементная конфигурация инфразвуковой группы. В инфразвуковой станции МСМ используется от четырех до пятнадцати разнесенных воздухозаборников с различной геометрией их размещения [3]. В случае КИЗ четыре ветровых фильтра рас-

полагаются в вершинах четырехугольника с максимальной площадью охвата при условии, что углы между всеми его сторонами составляют  $\geq 6^\circ$ . Это позволяет обеспечить более гладкую индикатрису погрешности кругового пеленга, чем в случае с параллельными сторонами четырехугольника. Пятый элемент инфразвуковой группы размещают в ее центре, тем самым несколько расширяя частотный диапазон пеленга в область высоких частот и позволяя осуществлять пеленг одновременно по восьми формируемым эффективным треугольным полигонам.

В целом, частотный диапазон пеленгуемых с приемлемой точностью инфразвуковых волн для описанной геометрии инфразвуковой группы составляет, по нашим наблюдениям,  $(0.02-2)C_S/S^{1/2}$ . Здесь  $C_S$  – скорость следа инфразвуковой волны,  $S$  – площадь инфразвукового полигона.

В КИЗ в качестве воздухопроводов использованы 100-метровые металлопластиковые трубы с внутренним диаметром 12 мм. В результате апертура инфразвуковой группы составляет около 140 м, что позволяет развернуть инфразвуковую группу на территории типовой метеорологической станции [14], а единственный приборный шкаф установить в охраняемой зоне.

При такой конфигурации и геометрии инфразвуковой станции возникают 2 вопроса. Первый – не препятствует ли использование длинных воздухопроводов нормальному функционированию инфразвуковой станции? Ответ на этот вопрос дает рис. 2, на котором представлена а.ч.х. измерительной цепи КИЗ (ветровой фильтр–воздуховод–микробарометр–аналоговый электрический сигнал) при различных ее модификациях.

Для построения графика использовались данные измерений от нескольких одновременно действовавших идентичных акустоэлектрических преобразователей (а.э.п.), разработанных в НПО “Тайфун” и установленных в едином приборном шкафу. В качестве эталонного микробарометра использовался а.э.п., откалиброванный во ВНИИФТРИ [15]. К а.э.п. были подключены металлопластиковые воздухопроводы различной длины (от 0 до 125 м) и розеточные ветровые фильтры разного диаметра (см. рис. 2). Все ветровые фильтры и воздухопроводы располагались на небольшой территории.

Для обеспечения идентичности входных сигналов и уменьшения влияния турбулентных ветровых пульсаций на показания а.э.п. для анализа были выбраны 25 случаев регистрации особо интенсивных инфразвуковых событий, наблюдавшихся в течение двух месяцев непрерывного мониторинга.

Из анализа рис. 2 следует, что воздухопроводы заметно и закономерно искажают спектр сигнала за счет интерференционных эффектов и акустиче-

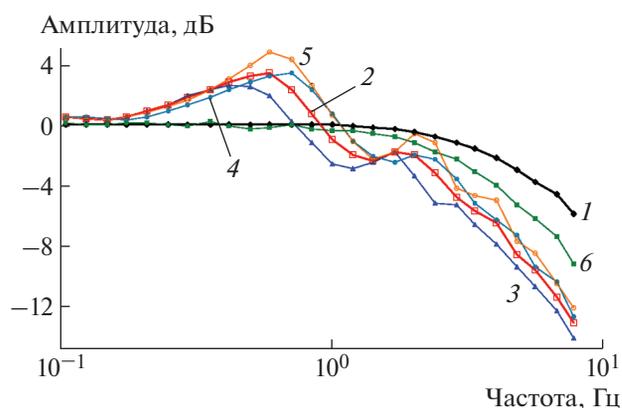


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики измерительных элементов КИЗ: 1 – а.э.п. [15]; 2 – КИЗ в целом (ветровой фильтр  $\varnothing 18$  м + воздуховод длиной 100 м + а.э.п.); 3 – то же, что и 2, но воздуховод длиной 125 м; 4 – то же, что и 2, но воздуховод длиной 80 м; 5 – то же, что и 2, но ветровой фильтр отсутствует; 6 – ветровой фильтр  $\varnothing 6$  м + капилляр + воздуховод длиной 9 м + а.э.п. В диапазоне частот 0.01–0.1 Гц все а.ч.х. близки к 0 дБ (на рисунке не показано). 0 дБ соответствует 390 мВ/Па.

ского сопротивления воздуховода. Резонансная частота при этом обратно пропорциональна длине воздуховода, а его акустическое сопротивление пропорционально длине воздуховода и обратно пропорционально четвертой степени его диаметра. Выраженность резонанса несколько снижается при использовании ветрового фильтра. Главное, как показали наши многолетние наблюдения, а.ч.х. и ф.ч.х. КИЗ со временем практически не меняются, одинаковы по всем элементам инфразвуковой группы и могут быть учтены на стадии финальной обработки данных с помощью спектральной матрицы с постоянными поправочными коэффициентами.

Второй вопрос заключается в том, насколько эффективно использование инфразвуковых станций с относительно небольшой апертурой в геофизических приложениях. В технических требованиях к инфразвуковым станциям МСМ [13] указана ее минимальная апертура, составляющая 1000 м. Такая апертура наилучшим образом адаптирована к пеленгу инфразвуковых волн с периодом  $\sim 10$  с от ядерных взрывов мощностью несколько килотонн.

Однако подавляющее большинство геофизических явлений излучают инфразвук в более высокочастотной области. Кроме того, радиус пространственной когерентности инфразвуковых волн соизмерим с их длиной. Поэтому при наличии одиночных сигналов взрывного типа с крутыми фронтами потеря пространственной когерентности волны ведет к снижению помехозащитности и точности пеленга. При отсутствии выраженных фронтов у сравнительно высокочастотных сигналов (например, в случае микроба-

ром) они вообще не могут пеленговаться инфразвуковой станцией с километровой и более апертурой.

## 2.2. Разработка микробарометра

Исторически устройство для регистрации и визуализации инфразвуковых пульсаций давления имело название микробарограф. После того как практически вышли из употребления самописцы, микробарограф в зарубежной литературе стали называть микробарометром. Хотя терминологически точнее назвать такое устройство акустоэлектрический преобразователь (поскольку оно предназначено для преобразования акустических колебаний давления в колебания электрического напряжения), ниже, в силу устоявшейся традиции, будем его часто называть микробарометром.

Известно множество конструкций микробарометров. Одни отличаются расширенным низкочастотным диапазоном [16–18], другие имеют низкую стоимость и малые габариты [19]. Однако описанные в [16–19] микробарометры имеют уровень собственных шумов, значительно превышающий обоснованные требования к инфразвуковым станциям МСМ [13].

В последнее десятилетие созданы микробарометры с крайне низким уровнем собственных шумов, например MB3a Infrasond Sensor [20] или Hyperion 5113/A Infrasond Sensor [21]. Но минимально наблюдаемый в природе уровень ветровых и акустических шумов не позволяет этому достоинству существенно проявиться на практике. При этом надежность работы и стабильность характеристик этих микробарометров вызывает пока сомнения [3].

Согласно работе [3], оптимально, когда уровень собственных шумов микробарометра примерно на 10 дБ ниже требований, указанных в [13]. В настоящее время 80% инфразвуковых станций МСМ используют микробарометр MB2005 [3], характеристики которого представлены в работе [22]. Далее именно с этим микробарометром и будем сравнивать а.э.п.

Акустоэлектрический преобразователь является разновидностью микробарометров дифференциального типа, т.е. его принцип действия основан на измерении разности давлений в двух соединенных через капилляр камерах, одна из которых герметична, а другая сообщается с атмосферой. Расчет характеристик таких микробарометров представлен в [23]. Особенностью а.э.п. является изготовление его чувствительного элемента из двух автономных узлов: дифференциального датчика давления и механического высокочастотного фильтра. В конечном счете, это позволило использовать серийный дифференци-

альный датчик давления и сконцентрироваться на разработке механического фильтра.

Дифференциальные датчики давления выпускаются рядом специализированных фирм. В случае, например, наиболее чувствительных датчиков с рабочим диапазоном около 20 Па фирм: “Ashcroft” (Германия), DRUCK (Великобритания) или “BD SENSORS GmbH” (Германия) – приведенный уровень собственных шумов удовлетворяет требованиям МСМ [13]. В а.э.п. использован датчик DXLdp-5-MB2-10-ST-P05IWL-XX1 фирмы “Ashcroft” [24] из-за его широкого рабочего диапазона температур (от  $-29$  до  $+71^{\circ}\text{C}$ ), малоинерционности и относительно невысокой стоимости.

Основной проблемой для микробарометров дифференциального типа является влияние температурных неоднородностей. Необходимо, чтобы вызываемые ими флуктуации разности средних температур в камерах ресивера не превышали миллионных долей градуса в рабочем диапазоне частот. Такому требованию удовлетворяет конструкция, эскиз которой представлен на рис. 3.

Массивный медный ресивер включает в себя две прилегающие друг к другу камеры. Каждая камера состоит из четырех цилиндрических секций суммарным объемом  $100\text{ см}^3$ . Расположение камер практически одинаково относительно вертикальной и горизонтальной плоскостей, что позволяет уменьшить влияние температурных градиентов и силы тяжести.

Камеры сообщаются между собой через специальный капилляр 3 из двух соосных коррозионно-стойких тонких трубок с немного различающимися диаметрами. Осевое перемещение одной заглушенной трубки относительно внутренней поверхности другой позволяет регулировать пневматическое сопротивление образующегося кольцевого канала и тем самым настроить одинаковую нижнюю частоту среза частотной характеристики для всех а.э.п.

Ресивер 2 помещен в теплоизолированный кожух 1. Входной штуцер подключен к контролируемой атмосфере, а два выходных штуцера – к входам дифференциального датчика давления. Механический фильтр и дифференциальный датчик давления монтируются на общем шасси и помещены в теплоизолированный корпус. На рис. 4 показаны фотографии а.э.п. и его основных компонентов.

На рис. 5 показаны результаты сравнения отфильтрованных в октавных полосах частот среднеквадратичных значений амплитуды пульсаций давления по данным двух а.э.п., двух микробарометров K304A и микробарометра MB2005. Все микробарометры подключались к общему источнику. Для частот ниже  $1/4$  Гц использовались данные, усредненные по трем 8-часовым сериям измерений атмосферных пульсаций давления.

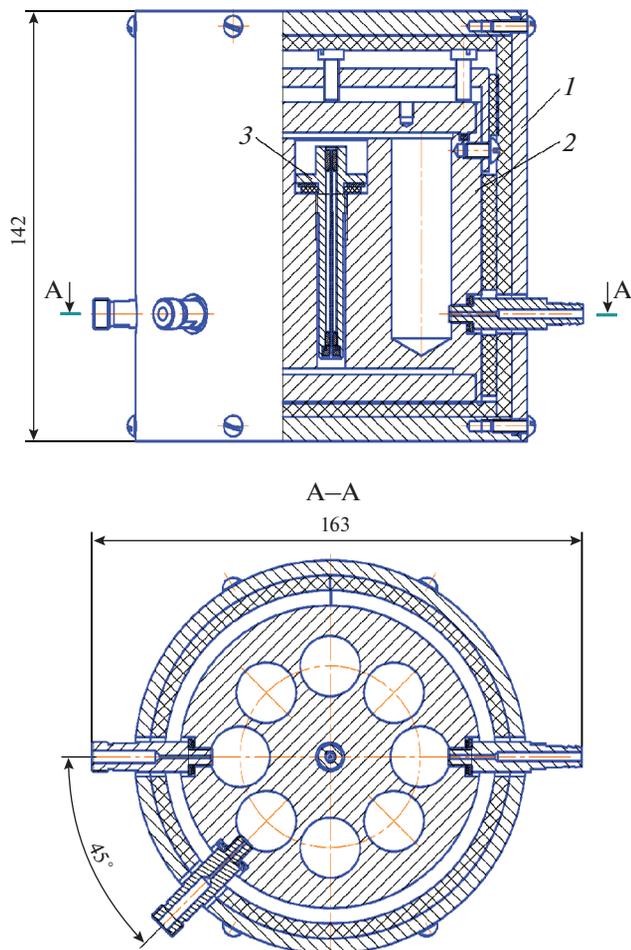


Рис. 3. Конструкция механического высокочастотного фильтра. 1 – теплозащитный кожух, 2 – двухкамерный ресивер, 3 – капилляр.

Для частот от 1/4 Гц и выше использовались усредненные результаты по 15-ти шестиминутным сериям измерений монохроматических пульсаций давления, создаваемых макетом программируемого источника пневматических колебаний.

Уровень “0” дБ восстанавливался до частоты 0.01 Гц по данным калибровки а.э.п. № 052 во ВНИИФТРИ [15]. Для более низких частот уровень “0” дБ определялся по данным низкочастотного выхода микробарометра МВ2005. Важно, что данные микробарометров всех типов согласуются между собой в диапазоне частот 0.02–4 Гц.

Амплитудно-частотные характеристики двух а.э.п. практически одинаковы между собой в диапазоне частот 0.005–10 Гц и имеют выраженный завал на “хвостах” этого диапазона. Данные двух К304А имеют больший разброс и меньший завал а.ч.х., чем у а.э.п. Данные МВ2005 соответствуют его паспортным характеристикам [22], но демон-

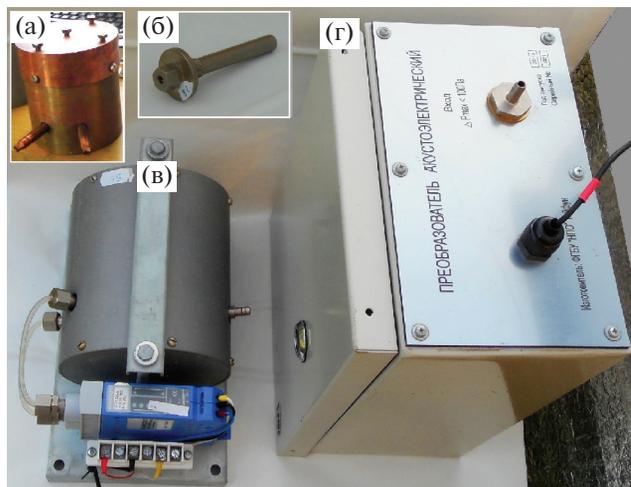


Рис. 4. Основные компоненты а.э.п.: а – двухкамерный ресивер; б – капиллярный узел; в – дифференциальный датчик давления и термоизолированный ресивер в сборе; г – общий вид микробарометра для инфразвуковой станции.

стрируют, возможно, избыточную чувствительность микробарометра в области частот выше 4 Гц.

Согласно требованиям [13], а.ч.х. микробарометров должна быть равномерной в рабочем диапазоне частот и спадать на минус 3 дБ вблизи его границ. Однако это требование в настоящее время избыточно в связи с возможностью выравнивания а.ч.х. цифровыми фильтрами при необходимости.

В нашем случае такой необходимости нет, поскольку выделение из шумов и пеленг сигнала осуществляются независимо в узких полосах, равномерно покрывающих весь рабочий диапазон частот [25], а неравномерность а.ч.х. КИЗ в целом учитывается на финальной стадии обработки. Главное, чтобы а.ч.х., и особенно ф.ч.х., микробарометров, формирующих инфразвуковую группу станций, были максимально идентичны между собой, что мы и наблюдаем для а.э.п.

На рис. 6 представлены результаты спектральной оценки собственных шумов а.э.п. В условиях штиля вход а.э.п. № 052 заглушался, а вход а.э.п. № 053 оставался открытым. Тем самым выходной сигнал а.э.п. № 052 почти полностью определялся электрическими шумами дифференциального датчика. Как обычно, некоторое влияние пульсаций давления в окружающей среде на выходной сигнал микробарометра все же имело место в наиболее низкочастотной области. Поэтому рассчитывались скорректированные спектры шумов микробарометра  $Sk_r$ , для которых коэффициент корреляции с пульсациями давления стремился к нулю.

В результате, после учета а.ч.х. а.э.п. (см. рис. 5) получены следующие оценки: спектральная плотность приведенных собственных шумов на

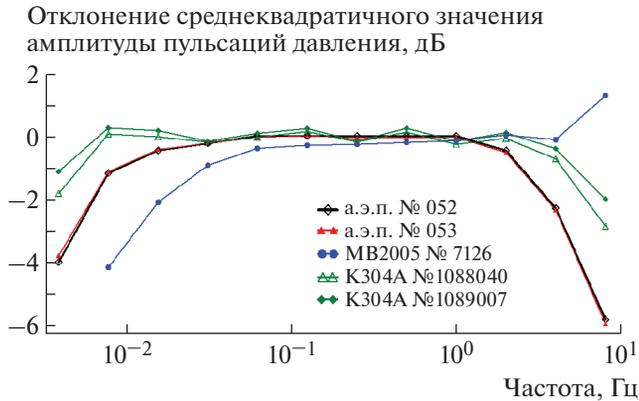


Рис. 5. Разброс и отклонение а.ч.х. относительно уровня “0” дБ для различных микробарометров.

частоте 1 Гц составила  $0.08 \text{ мПа}^2/\text{Гц}$ , среднеквадратичное значение приведенных собственных шумов в диапазоне частот 0.02–4 Гц –  $0.67 \text{ мПа}$ . Эти величины в несколько раз меньше, чем у микробарометра МВ2005 [22], а также ниже предельных допусков, указанных в [13].

К достоинствам разработанного а.э.п. относятся его надежность, экономичность, расширенный низкочастотный диапазон, устойчивость к погодным условиям, высокая чувствительность и стабильность метрологических характеристик, что будет продемонстрировано ниже. Относительными недостатками а.э.п., значимость которых, как показал наш опыт, незначительна в рамках решения задач инфразвукового мониторинга, являются ограничение максимальной амплитуды измеряемых входных пульсаций давления величиной  $\sim 10\text{--}15 \text{ Па}$  и их максимальной частоты – величиной  $\sim 8\text{--}10 \text{ Гц}$ .

### 2.3. Фильтры ветровых помех

За основу конструкции фильтров ветровых помех выбрана хорошо зарекомендовавшая себя 18-метровая розеточная конфигурация [3], состоящая из центральной розетки и четырех периферийных розеток с 16-ю входами каждая. В процессе разработки ветровых фильтров нами проверялись различные варианты такой конструкции. Основная цель заключалась в обеспечении надежности эксплуатации, простоте изготовления и развертывания, низкой стоимости фильтра.

На рис. 7 показана финальная конструкция ветрового фильтра, использованная в КИЗ. Ее особенность заключается в том, что она собрана из серийно выпускаемых, устойчивых к погодным условиям элементов при отсутствии какой-либо механической обработки, за исключением обрезки пластиковых труб и их сварки.

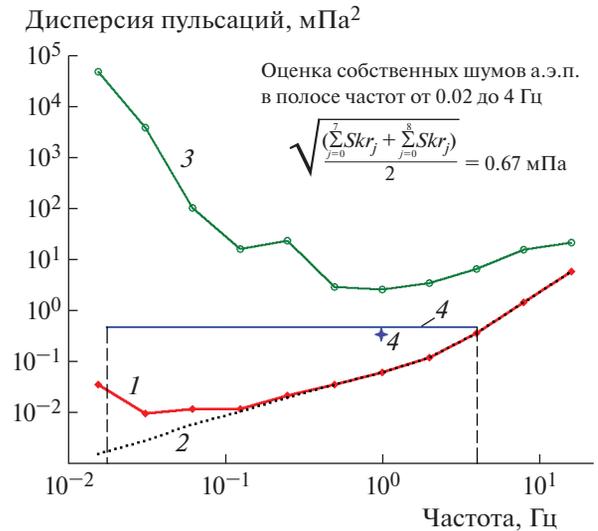


Рис. 6. Рассчитанный с учетом а.ч.х. энергетический спектр собственных шумов а.э.п. (1) и его коррекция (2) в сопоставлении со спектром ветровых помех при штиле (3) и требованиями МСМ (4).

Радиально расходящиеся от периферийных розеток лучи ветрового фильтра представляют собой 3-метровые отрезки металлопластиковой трубы, заканчивающиеся полуметровыми съемными открытыми отрезками пористого шланга. Это препятствует глубокому проникновению загрязнений и насекомых в лучи, упрощает их очистку после длительной эксплуатации, ослабляет резонансные эффекты.

Благодаря пластичности и гибкости металлопластиковых труб они укладываются на любой местности, в том числе в лесу. Центральные части ветрового фильтра приподняты над землей (для исключения попадания влаги во время дождя и таяния снега), а их концы, наоборот, прижаты к земле (для уменьшения ветровых помех). При необходимости каждый луч может быть отсоединен от розетки благодаря его креплению посредством разборных фитингов.

### 2.4. Система сбора и передачи данных, прочие элементы станции

Для сбора данных и передачи их на локальный сервер использованы 24-битный 16-канальный модуль Z220 российской фирмы ZetLab [26] и поставляемое с модулем программное обеспечение “Многоканальный самописец”. Поскольку модуль рассчитан на штатную эксплуатацию в диапазоне температур от  $-10$  до  $+50^\circ\text{C}$ , он помещен в дополнительно обогреваемый корпус.

Все наружное оборудование установлено в приборном шкафу модели МПШ 0696 [27]. Его достоинство заключается в устойчивости к погод-

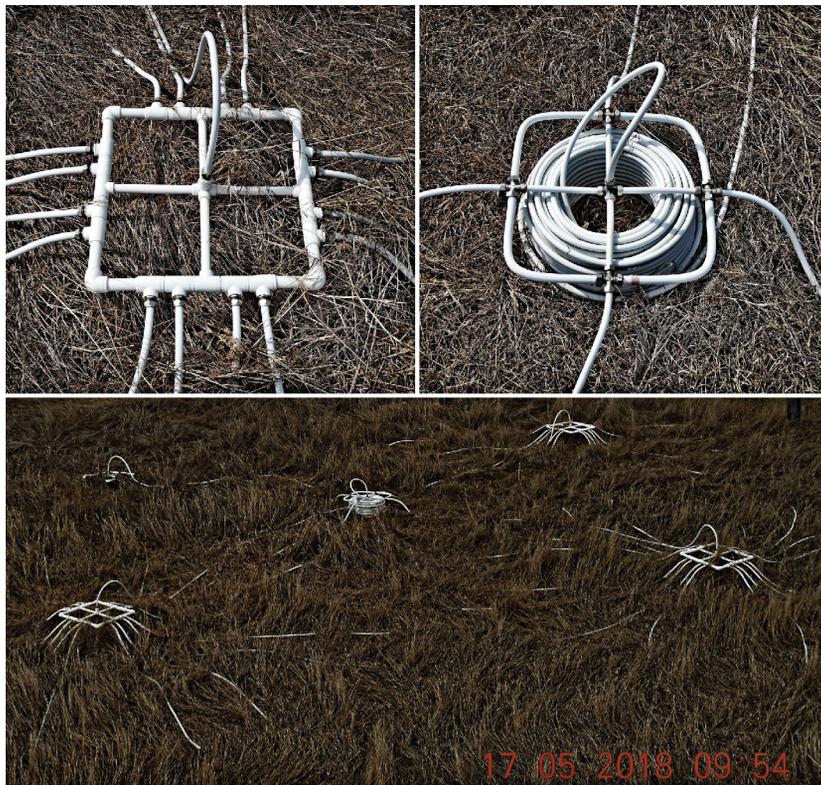


Рис. 7. Фотографии ветрового фильтра (внизу) и основных его элементов: периферийной (слева сверху) и центральной (справа сверху) розеток – в г. Покровске (Якутия).

ным условиям, двухдверном варианте исполнения, наличии антивандального замка. Предусмотрена возможность обогрева приборного шкафа с помощью комплекта нагревателей с питающим напряжением 36 В, что позволяет обеспечить для КИЗ в целом климатическое исполнение УХЛ1.

Приборный шкаф оснащен пятью двухвентильными коллекторами, позволяющими заглушать каждый а.э.п., подключать его к ветровому фильтру или к общему входу в случае проведения сверки. Таким образом решается задача проверки собственных шумов, а.ч.х. и ф.ч.х. микробарометров на месте эксплуатации.

Для проведения сверок и калибровок а.э.п. в полевых условиях создан макет программируемого источника колебаний давления в инфразвуковом диапазоне частот. В его основе лежит электродинамическая головка со 120-мм диффузором. Амплитудно-модулированный килогерцовый сигнал подается на демодулятор, выделяющий низкочастотную огибающую, от которой получает питание электродинамик. Программа сверки задается в виде аудиофайла, записанного на USB-флеш-накопителе.

Диффузор динамика сообщается с атмосферой через небольшое выходное отверстие, к которому с помощью воздухораспределителя и воздухово-

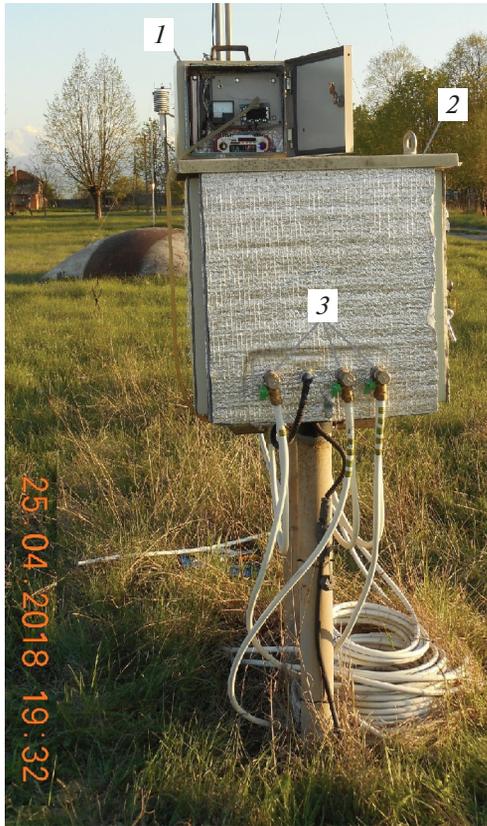
дов подключаются сверяемые микробарометры. Макет устройства позволяет генерировать колебания давления заданной формы с амплитудой до 2 Па в диапазоне частот 0.25–16 Гц.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОСОБЕННОСТИ ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНФРАЗВУКОВЫХ СТАНЦИЙ

Комплексы инфразвукового мониторинга развернуты и используются на протяжении 4 лет в шести пунктах РФ: д. Вашутино (55.15° N; 36.56° E), г. Ардон (43.18° N; 44.34° E), п. Воейково (59.95° N; 30.71° E), г. Покровск (61.49° N; 129.2° E), г. Кандалакша (67.17° N; 32.35° E) и п. Начики (53.11° N; 157.7° E). Кроме того, в 4 км от д. Вашутино в г. Обнинске на полигоне высотной метеорологической мачты 6 лет работает экспериментальный инфразвуковой комплекс.

Данные с локальных серверов КИЗ поступают через интернет каждые 10 мин в геофизический центр “Верхняя атмосфера” в НПО “Тайфун”, где подвергаются оперативной обработке с помощью специализированного программного обеспечения [25].

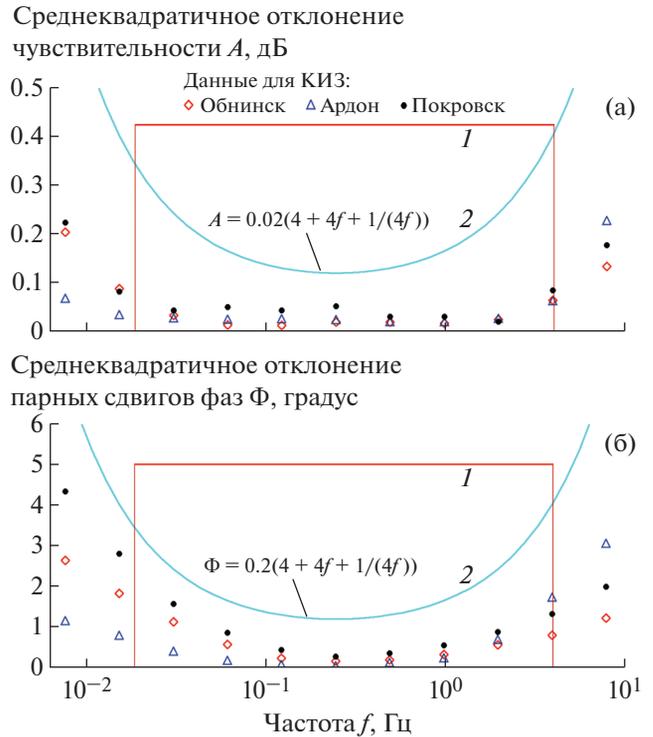
Комплексы работают полностью автономно на территориях метеорологических станций Росгид-



**Рис. 8.** Фотография КИЗ в процессе сверки/калибровки в полевых условиях в г. Ардоне. 1 – макет источника инфразвуковых колебаний, 2 – приборный шкаф с пятью а.э.п., 3 – распределительный узел для измерения/сверки.

ромета. Примерно 1–2 раза в год командиром специалистом проводятся инспекции состояния КИЗ и регламентные работы. Последние включают в себя внешний осмотр аппаратуры и ветровых фильтров, проверку герметичности воздухопроводов, очистку и продувку лучей ветровых фильтров, проведение сверки а.э.п. В случае необходимости осуществляются ремонтные работы. Фотография КИЗ в процессе его сверки/калибровки представлена на рис. 8, его характеристики – на рис. 9.

На рис. 9 показаны взаимные среднеквадратичные отклонения а.ч.х. и ф.ч.х. в трех 5-элементных группах а.э.п. после нескольких лет их эксплуатации в Обнинске, Ардоне и Покровске. Представлены аппроксимирующие экспериментальные данные кривые и предельно допустимые для инфразвуковых станций МСМ величины [3]. Следует отметить, что, несмотря на определяющее влияние отклонений ф.ч.х. измерительной цепи инфразвуковых станций на точность пеленга, в нормативах [13] не введены соответствующие допуски, по-видимому, из-за сложности поверки ф.ч.х. в конфигурации инфразвуковых



**Рис. 9.** Среднеквадратичные взаимные отклонения а.ч.х. (а) и ф.ч.х. (б) в трех группах а.э.п. после нескольких лет их эксплуатации без техобслуживания: 1 – предельно допустимые значения отклонений а.ч.х. и ф.ч.х. для инфразвуковых станций МСМ [3]; 2 – аппроксимирующие экспериментальные данные кривые.

станций МСМ. Поэтому на рис. 9б показан аналогичный норматив для сейсмических станций [3].

Из анализа рис. 9 следует, что в диапазоне частот 0.02–4 Гц разброс а.ч.х. и ф.ч.х. всех а.э.п. много меньше допустимых требований. И это несмотря на то, что а.э.п. в г. Покровске из-за неисправности термореле длительное время эксплуатировались при температуре воздуха внутри приборного шкафа ниже  $-50^{\circ}\text{C}$  и выше  $+60^{\circ}\text{C}$ . На границах рабочего диапазона частот разброс а.ч.х. и ф.ч.х. а.э.п. становится большим и необходимость его учета или коррекции уже определяется величиной апертуры инфразвуковых станций. В нашем случае это ведет к тому, что, несмотря на возможность выделения инфразвуковой волны во всем рабочем диапазоне КИЗ, ее приемлемый пеленг возможен для частот не ниже 0.02–0.05 Гц.

За годы работы были единичные случаи нарушения работы КИЗ. Дважды вандалами повреждались розетки ветровых фильтров. В п. Начики КИЗ становился неработоспособным во время обильных весенних половодий и разлива местной речки, поскольку ветровые фильтры оказывались

под водой. После завершения паводка нормальное функционирование КИЗ восстанавливалось.

Как правило, после года эксплуатации около 30% лучей ветровых фильтров оказываются забитыми грязью и гнездами насекомых и требуется прочистка концевых насадок у лучей. Ни разу не было проблем с затоплением приборных бункеров, повреждением электропитания или с синхронизацией данных, что нередко имело место на инфразвуковых станциях МСМ [3].

За все время не потребовалась замена а.э.п. или его элементов, не проводилась регулировка а.ч.х. и ф.ч.х. а.э.п., хотя возможности проведения этих работ в полевых условиях и были предусмотрены в конструкции а.э.п.

За время эксплуатации КИЗ в среднем на каждой станции ежесуточно автоматически регистрировалось и пеленговалось от 5 до 15 инфразвуковых событий, в числе которых взрывы на армейских складах и полигонах, гроззовая активность, землетрясения, извержения вулканов, падение болидов, пожары, техногенная активность. Регулярно пеленгуются сигналы микробаром. Некоторые примеры применения КИЗ представлены в [25].

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные достоинства созданных инфразвуковых станций КИЗ — надежность их автономной работы и многократно сниженные стоимость и эксплуатационные затраты по сравнению с типовой инфразвуковой станцией МСМ. Это позволяет создавать инфразвуковые комплексы в условиях образовательных и научных организаций, широко использовать их в атмосферных исследованиях.

Тенденции модернизации инфразвуковых станций МСМ, обусловленные требованием надежности и качества измерений, приближают их по структуре к станциям КИЗ. В частности, все чаще пункты регистрации давления связывают не только кабелем питания от общего источника электроэнергии, но и оптоволоком с единым источником синхронизации [3]. Это значит, что вместо кабелей от единого пункта инфразвуковых станций МСМ к его удаленным ветровым фильтрам могут быть проложены металлопластиковые воздуховоды соответствующего диаметра и длины. Тем самым конфигурация инфразвуковых станций МСМ становится тождественной конфигурации станций КИЗ, приобретая их достоинства.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках программ по модернизации наблюдательной сети Росгидромета.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bedard A.J., Georges T.M.* // *Physics Today*. 2000. V. 53. № 3. P. 32. <https://doi.org/10.1063/1.883019>
2. *Sutherland L.C., Bass H.E.* // *J. Acoust. Soc. Am.* 2004. V. 115. № 3. P. 1012. <https://doi.org/10.1121/1.1631937>
3. *Marty J.* The IMS infrasound network: current status and technological developments // In: *A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne* (eds). *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. 2nd edn. Dordrecht: Springer, 2019. P. 3–62.
4. *Marchetti E., Walter F., Barfucci G., Genco I R., Wenner M., Ripepe M., McArdell B., Price C.* // *Journal of Geophysical Research F: Earth Surface*. 2019. V. 124. № 2. P. 567. <https://doi.org/10.1029/2018JF004785>
5. *Ulivieri G., Marchetti E., Ripepe M., Chiambretti I., Rosa G., Segor V.* // *Cold Regions Science and Technology*. 2011. V. 69. P. 177. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.09.006>
6. *Рыбнов Ю.С., Попова О.П., Харламов В.А., Соловьев А.В., Русаков Ю.С., Глухов А.Г., Silber E., Подобная Е.Д., Суркова Д.В.* // *Динамические процессы в геосферах*. Выпуск 4: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2013. С. 21.
7. *Фирстов П.П.* *Вулканические акустические сигналы диапазона 1.0–10 Гц и их связь с взрывным процессом*. Петропавловск-Камчатский: изд-во КамГПУ, 2003.
8. *Асминг В.Э., Баранов С.В., Виноградов А.Н., Виноградов Ю.А., Федоров А.В.* // *Акустический журнал*. 2016. Т. 62. № 5. С. 582. <https://doi.org/10.7868/S0320791916040031>
9. *Assink J., Smets P., Marcillo O., Weemstra C., Lalonde J., Waxler R., Evers L.* *Advances in Infrasonic Remote Sensing Methods* // In: *A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne* (eds). *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. 2nd edn. Dordrecht: Springer, 2019. P. 605–632.
10. *Hedlin M.A.H., Walker K., Drob D.P., Groot-Hedlin C.D.* // *Annual Rev. Earth Planet. Sci.* 2012. V. 40. P. 327. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105508>
11. *Chunchuzov I., Kulichkov S.* Internal gravity wave perturbations and their impacts on infrasound propagation in the atmosphere // In: *A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne* (eds). *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. 2nd edn. Dordrecht: Springer, 2019. P. 551–590.
12. *Иванов В.Н., Русаков Ю.С.* // *Труды 32-й сессии Российского акустического общества*. М.: ГЕОС, 2019. С. 31. ISBN 978-5-89118-802-0.
13. *Operational manual for infrasound monitoring and the international exchange of infrasound data (draft)*. 2009. СТВО. СТBT/WGB/TL-11,17/17/Rev.5.
14. РД 52.04.567-2003. *Положение о государственной наблюдательной сети*. СПб.: Гидрометеоздат, 2003.
15. *Акустоэлектрический преобразователь*. ФГБУ НПО “Тайфун”. Сертификат о калибровке N 3/340-0562-16 ФГУП “ВНИИФТРИ”, 2016.

16. *Бовишверов В.М., Грачев А.И., Ломадзе С.О., Матвеев А.К.* // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1979. Т. 15. № 1. С. 1215.
17. *Куличков С.Н., Буш Г.А., Перепёлкин В.Г., Кузнецов Р.Д., Каллистратова М.А.* Патент на полезную модель № 83625. Класс G 01 W1/02. // Бюл. № 16. Оpubл. 10.06. 2009.
18. *Ахметов О.И., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В., Днепровский Д.В.* // ПТЭ. 2010. № 5. С. 137.
19. *Marcillo O., Jonson J.B.* // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2012. V. 29. P. 1275. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00101.1>
20. *Merchant B.J., McDowell, K.D.* MB3a infrasound sensor evaluation. Technical report. Sandia National Laboratories. 2014. <https://doi.org/10.2172/1165050>
21. *Merchant J.* Hyperion 5113/A infrasound sensor evaluation. Technical report. Sandia National Laboratories, 2015. <https://doi.org/10.2172/1221711>
22. MB2005 User Manual. CEA/Martec. Ref: 14643-D. December 2007.
23. *Mentink J.H., Evers L.G.* // The Journal of the Acoustical Society of America. 2011. V. 130. № 1. P. 33. <https://doi.org/10.1121/1.3596718>
24. DXLdp Ultra-Low Differential Pressure Transmitter. Datasheet. revB-04\_19. Ashcroft Instruments GmbH, 2019. P. 4.
25. *Русаков Ю.С.* // Труды 32-й сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2019. С. 38. ISBN 978-5-89118-802-0.
26. Технические характеристики модулей АЦП, ЦАП ZETLAB. <http://www.zet.nt-rt.ru/images/manuals/Modulecp.pdf>
27. Малогабаритные приборные шкафы МПШ. ООО “Спецстройкомплект”. Белгород, 2019. <http://www.sskr.ru/mpsh.htm>