

ГЛАВА 2. Аппаратура и методика наблюдений акустических и сейсмических сигналов

Комплексные наблюдения за сейсмическим и акустическим излучением извержений вулканов Камчатки проводились автором, начиная с 1970 г. В качестве датчиков микрофлуктуаций атмосферного давления использовались микробарографы электродинамического типа. Для регистрации сейсмических сигналов использовались стандартные сейсмоприёмники также электродинамического типа.

2.1. Электродинамические микробарографы серии ЭДМБ и их конструктивные особенности

В конце 50^х годов XX века был серийно изготовлен электродинамический микробарограф ЭДМБ-IV (*Пасечник, Федосеенко, 1958*), который в течение почти двух десятилетий активно использовался для регистрации акустических сигналов в атмосфере как от различных природных источников, так и от воздушных ядерных взрывов (рис.2.1). К сожалению, ЭДМБ-IV был изготовлен ОКБ ИФЗ малой серией и концу 70^х годов стал музейной редкостью.

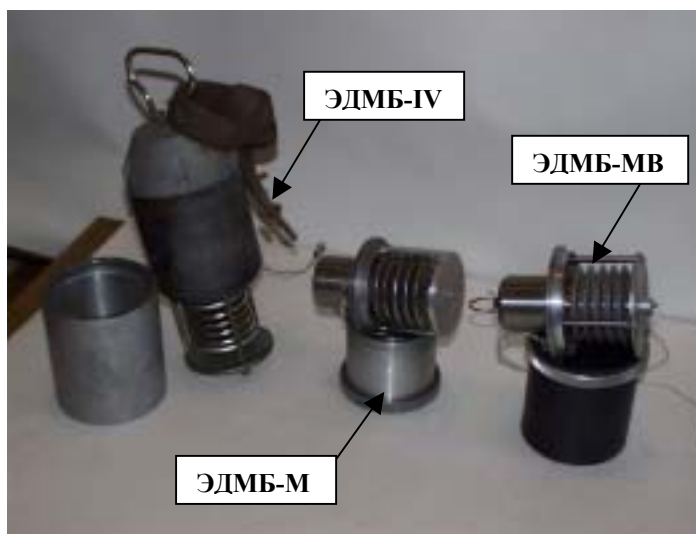


Рис.2.1. Общий вид электродинамических микробарографов, которые применялись для регистрации вулканических АС.

Попытка регистрации инфразвуковых колебаний от вулканических извержений этим микробарографом была предпринята *П.И.Токаревым (1964)* в 60^х годах. В 70^х годах этот микробарограф был успешно применен автором для регистрации слабых воздушных ударных волн от вулканических взрывов и инфразвуковых колебаний на некоторых вулканах Камчатки (*Фирстов и др., 1978 в*).

Для регистрации слабых воздушных ударных волн, с целью определения безопасности их действия на карьерах и разрезах, в Магнитогорском горно-металлургическом институте в 1980 г. была изготовлена серия электродинамических микробарографов ЭДМБ-М (*По-*

номарев и др., 1982), которые конструктивно выполнены аналогично ЭДМБ-IV, но использована компактная магнитная система от сейсмоприёмника СВ-05 (рис.2.1). Микробарограф ЭДМБ-М в начале 80^х годов использовался как приемник акустических сигналов, связанных с извержениями вулканов. Регистрация осуществлялась в тяжелых климатических условиях в высокогорных районах Камчатки. В результате эксплуатации ЭДМБ-М в комплекте с модернизированным сейсмическим усилителем постоянного напряжения (УПН-3) получены записи акустических сигналов с избыточным давлением $\Delta P = 2 \div 500$ Па в частотном диапазоне $1 \div 10$ Гц (*Фирстов, Сторчев, 1987*). Опыт работы с комплектом ЭДМБ-М + УПН показал его хорошие эксплуатационные качества, надежность в работе, но также выявил ряд конструктивных недостатков микробарографа ЭДМБ-М.

Отсутствие отечественных серийно выпускаемых приемников микрофлуктуаций атмосферного давления, а также расширение в 80^е годы работ, связанных с регистрацией АС от вулканических извержений, заставили организовать изготовление микробарографа ЭДМБ-МВ, в конструкцию которого были внесены отдельные изменения, устранявшие недостатки предшествующей модели (см. рис.2.1).

Чувствительным элементом в ЭДМБ-МВ является блок из 5 последовательно соединенных анероидных коробок (барокоробка). Применяемые для изготовления микробарографов барокоробки изготавливались Рижским заводом геофизического приборостроения в двух модификациях: 1) М22А из бериллиевой бронзы, БрБ 2,5; 2) А22-7 из стали 42НХ со следующими техническими характеристиками:

- ход барокоробок, проверенный в условиях комнатной температуры при перепаде давления от $1,05 \cdot 10^5$ до $5 \cdot 10^5$ Па, равен $3,2 \pm 0,4$ мм - для М22А и $3,3 \pm 0,3$ мм - для А22-7;
- величина температурной погрешности на уровне моря составляет $5,4 \cdot 10^{-4}$ мм/°С - для М22А и $4,3 \cdot 10^{-4}$ мм/°С - для А22-7.

Из технических характеристик следует, что при резких перепадах температуры окружающей среды более предпочтительно применение барокоробок А22-7, которые нами и использовались.

В ЭДМБ-МВ конструктивно один конец блока из пяти барокоробок прикреплен к неподвижному корпусу, а другой соединен с подвесной системой электродинамического преобразователя от сейсморазведочного сейсмоприемника СВ-0,5 (рис. 2.1). Наведенная в катушке ЭДС пропорциональна скорости перемещения, поэтому электродинамический микробарограф регистрирует скорость изменения атмосферного давления.

Для согласования с электронными усилителями ЭДМБ-МВ стандартная катушка от сейсмоприемника СВ-0,5 перематывалась и имела две обмотки:

- 1) рабочая, $R_1 = 2,5 \div 3,0$ кОм;

2) дополнительная, $R_2 = 0,2 \div 0,3$ кОм.

Для предохранения от внешних механических воздействий блок anerоидных коробок помещается в стакан, соединенный муфтой с крышкой, на которой крепится магнитная система и подвесная система катушки. Для выравнивания давления в полости корпуса с атмосферным давлением в днище стакана микробарографа сверлилось отверстие диаметром 2 мм.

Поверка изготовленных ЭДМБ-МВ проводилась в режиме стационарных синусоидальных колебаний давления с помощью калибровочного устройства, прошедшего аттестацию службы госстандарта. Поверка проводилась по следующей схеме: прибор помещался в герметическую камеру, где имитировались колебания атмосферного давления по синусоидальному закону для ряда дискретных частот, перекрывающих диапазон 0,3-25 Гц. Избыточное давление в камере измерялось в статическом режиме образцовым многопредельным микроманометром ММН-2400-1. Сигнал с рабочей катушки микробарографа подавался на вход усилителя быстродействующего прибора Н327 или Н3031. В результате вычислялся коэффициент преобразования, который равен отношению величины ЭДС к скорости изменения давления.

На рис.2.2. приведены примеры тарировочных графиков для пяти микробарографов, а в таблице 2.1. приведены основные параметры для серии из семи микробарографов.

Таблица 2.1. Тарировочные характеристики ЭДМБ-МВ

| № | Сопротивление рабочей катушки, кОм | Коэффициент преобразования, мкВ*с/Па | Сопротивление дополнительной, катушки кОм | Коэффициент преобразования, мкВ*с/Па |
|---|------------------------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------------|
| 1 | 2,76 | 36±4 | 0,21 | 8 |
| 2 | 2,76 | 35±3 | 0,21 | 6 |
| 3 | 2,59 | 33±2 | 0,23 | 6 |
| 4 | 2,67 | 33±2 | 0,21 | 9 |
| 5 | 2,79 | 34±2 | 0,22 | 8 |
| 6 | 2,69 | 38±4 | 0,22 | 7 |
| 7 | 2,95 | 42±5 | 0,22 | 8 |

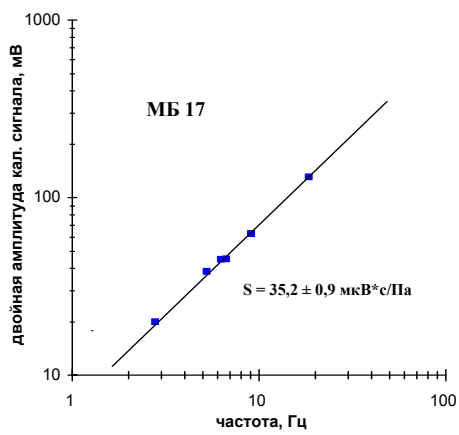
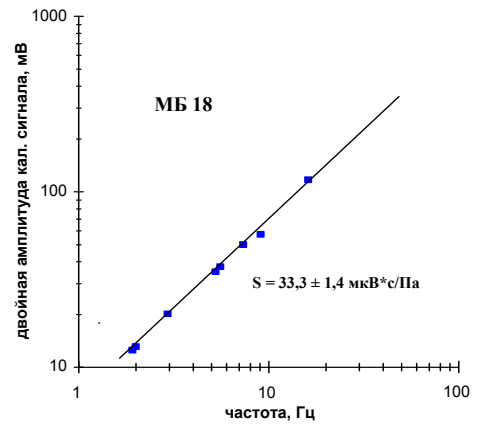
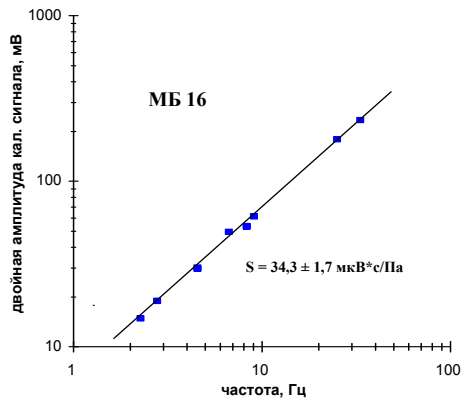
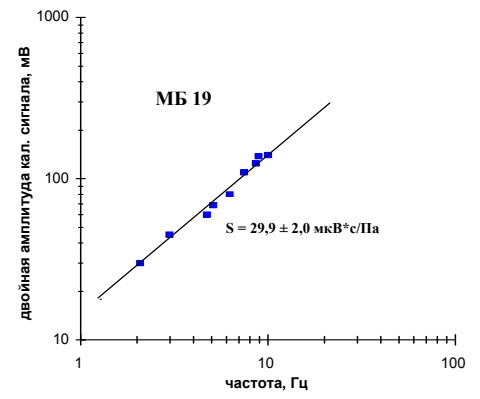
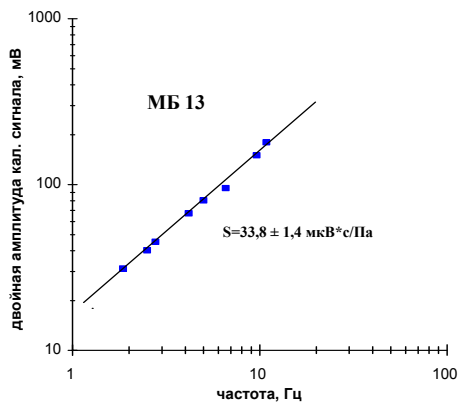


Рис. 2.2. Примеры тарировки микробарографов
ЭДМБ-МВ

ЭДМБ-МВ прошел метрологическую аттестацию в Камчатском центре стандартизации и метрологии. По результатам метрологических исследований изделие ЭДМБ-МВ признано годным к эксплуатации и аттестовано со следующими параметрами:

1. Активное сопротивление основной катушки, кОм..... 2,7±5%.
2. Активное сопротивление дополнительной катушки, кОм.....0,23±3%.
3. Коэффициент преобразования основной катушки, мкВ*с/Па..... 36±10%.
4. Коэффициент преобразования дополнительной катушки, мкВ*с/Па.....7±14%.
5. Габаритные размеры, мм.....d=90, h=140.
6. Масса, кг.....0,9.
7. Объем изделия, см³.....220.

2.3. Калибровочное устройство для определения амплитудно-частотных характеристик микробарографических каналов

Метрологическое обеспечение играет важную роль в получении объективной и достоверной информации, а также интерпретации получаемых данных тем или иным измерительным устройством. Поэтому, для определения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) микробарографических каналов, были сконструированы и изготовлены два калибровочных устройства:

А) для проведения калибровки при работе в полевых условиях по регистрации слабых воздушных ударных и инфразвуковых волн, сопровождающих извержения вулканов;

В) для калибровки стационарной аппаратуры, регистрирующей длинноволновые возмущения в атмосфере.

Конструктивно оба устройства выполнены аналогично и состоят из следующих узлов (рис.2.3.): электродвигатель (1), редуктор (2), нагнетательное устройство (3), герметичная камера (4), водяной манометр (5).

С помощью нагнетательного устройства в герметичной камере, в которой помещается ЭДМБ-МВ, объем изменяется по синусоидальному закону на величину ΔV , что приводит к колебаниям давления в камере на величину ΔP , которую можно найти расчетным путем (изотермический процесс): $\Delta V/V = \Delta P/P$; где P - значение атмосферного давления, а V - объем камеры. Герметичная камера представляет собой цилиндр: А) d=13,1см; H=18,3см; V=2465см³; Б) d=16,3см; H=28,7см; V=5990см³.

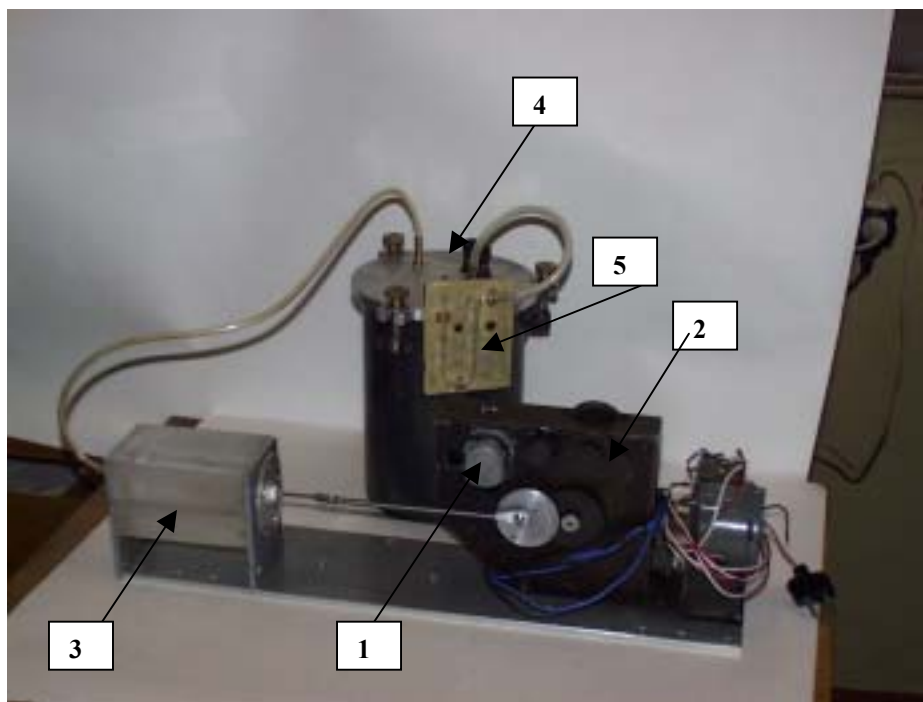


Рис.2.3. Общий вид калибровочного устройства (Б) для тарировки ЭДМБ-МВ и определения амплитудно-частотных характеристик микробарографических каналов.

В качестве нагнетательного устройства использован медицинский шприц объёмом 20см^3 , который вставлен в обойму из органического стекла с целью предохранения его от механических повреждений. Ход шприца, а соответственно ΔP , регулируется с помощью эксцентрика, который имеет 4 фиксированные положения, что соответствует ступенчатому изменению избыточного давления в пустой камере (двойная амплитуда $2\Delta P$): А) 466, 352, 220, 112 Па; Б) 196, 147, 101, 50 Па.

Вращение эксцентрику передается от асинхронного двигателя ДШМ-0,3 через ременную передачу и редуктор, оснащенный сменными шестернями. С помощью электродвигателя, сменных шкивов и шестерен частота колебаний давления в камере регулируется от 0,3 до 25 Гц. Калибровочное устройство Б, кроме того, оснащено еще одним двигателем с червячным редуктором, что дает возможность регулировать частоту колебаний давления в камере в диапазоне $1,2 \cdot 10^{-3} \div 0,2$ Гц.

Проверка калибровочного устройства заключается в измерении двойной амплитуды давления в камере при четырех фиксированных положениях эксцентрика. Проверка проводилась в статическом режиме микроманометром многопредельным ММН-2400, класс точности 1,0. При проверке учитывался дополнительный объём резервуара микроманометра и шланга, соединяющего камеру с трехходовым краном микроманометра.

На калибровочное устройство А в 1984 г. было получено свидетельство о метрологической аттестации в Камчатском центре стандартизации и метрологии. По результатам метро-

логической аттестации калибровочное устройство признано годным к эксплуатации. Наибольшая погрешность калибровки, с выводом сигнала на быстродействующие приборы типа Н3031, не превосходит 9%.

Тарировка производилась по следующей схеме. После загрузки микробарографов типа ЭДМБ в камеру, проверялась её герметичность с помощью водяного манометра. В случае микробарографа другого типа, к камере, после проверки её на герметичность, вместо манометра подключался вход датчика. При этом учитывались: изменение объёма камеры при помещении в неё микробарографа; изменение общего объёма за счет соединительных шлангов и рабочего объема подсоединенного прибора.

Сигнал от датчика прямо или через усилитель подавался на регистрирующий прибор, в качестве которого обычно применялись самописцы типа Н3031. На ленту самописца подавалась отметка времени от секундного хронометра или электронных часов. Выбиралось одно из возможных значений двойной амплитуды колебаний давления, и с помощью напряжения, подаваемого на электродвигатель, или редуктора изменялась частота колебаний давления.

При малых периодах процесс происходит почти адиабатически. Теплопроводностью можно пренебречь, тогда колебания давления имеют максимальную амплитуду ($\Delta P / \Delta P_{Ad} \longrightarrow 1$), т.е. $\Delta P \longrightarrow \Delta P_{Ad}$. Когда же колебания медленные, вследствие теплопроводности, процесс происходит почти изотермически:

$\Delta P \longrightarrow \Delta P_{из} = \Delta P_{ad} / \gamma = 0,71 \Delta P_{ad}$. Как показано в работе (Феофилактов, 1977),

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_{Ad}} = \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{u^2 + \gamma}{u^2 + 1/\gamma}},$$

где $u = \omega_0 / \omega$, а $\omega_0 = \beta / C_p C_V$. Частота целиком определяется величиной β коэффициента теплопроводности камеры. При $\omega = \omega_0$ ($U=1$)

$$\Delta P = \Delta P_{ad} / \sqrt{\gamma} = \sqrt{\Delta P_{ad}} \cdot \Delta P_{из},$$

т.е. величина амплитуды колебаний давления будет равна средней геометрической между ΔP_{Ad} и $\Delta P_{из}$ и составит 0,85 от ΔP_{Ad} . Таким образом, частота ω_0 характеризует переходную область между адиабатическим и изотермическим процессами.

Для расчета амплитуд ΔP на различных частотах необходимо знать зависящий от размеров бака коэффициент теплообмена или характеризующий его переходный период, соответствующий частоте ω_0 . Для нахождения ω_0 строился график спада амплитуды колебаний давления с увеличением периода при постоянном изменении ΔV . Замеры давления проводились с помощью микробарографа К304, который имеет строго постоянную чувстви-

тельность в диапазоне частот $0,2 \pm 0,003$ Гц. Полученные результаты усреднялись при помощи теоретической кривой спада давления. Перемещением этой кривой вдоль осей абсцисс и ординат добивалось наилучшее совпадение с экспериментальными точками (рис.2.4.) Переходный период для камеры калибровочного устройства Б оказался равен 45 с. Как видно на рис.2.4., до $f = 0,1$ Гц необходимо рассматривать процесс адиабатическим и это учитывать при калибровке микробарографов.

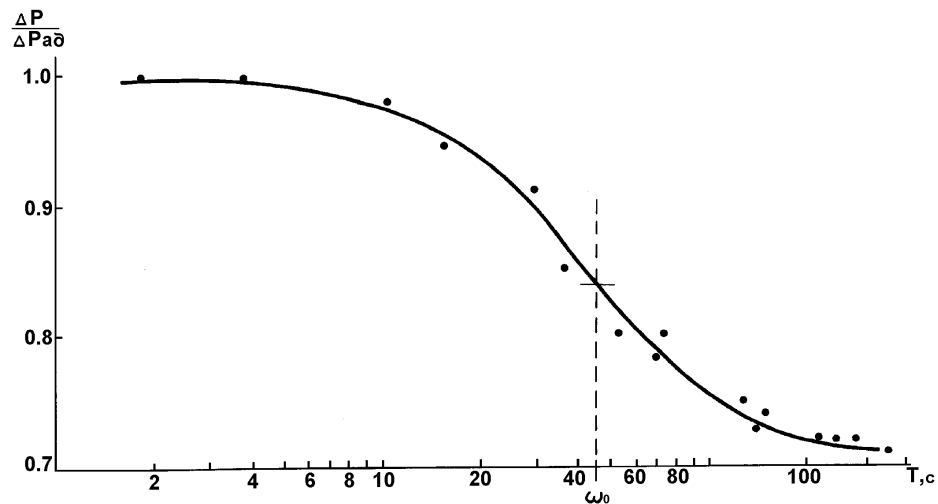


Рис.2.4. Экспериментальное определение переходного периода камеры калибровочного устройства (Б).

После измерения амплитуды и периода на регистрирующей аппаратуре в вольтах или миллиметрах находилась чувствительность $S = [В/Па]$ или $[мм/Па]$, в случае регистрации изменения давления, и $S = [В \cdot с/Па]$ или $[мм \cdot с/Па]$ для приборов, регистрирующих скорость изменения давления.

2.3. Сейсмические наблюдения

Региональная сеть камчатских сейсмических станций в течение последних двух десятилетий имела стандартную регистрирующую аппаратуру гальванометрического типа (Федотов и др., 1964). В качестве датчиков использовались сейсмографы ВЭГИК, СМ-2, которые нагружались на гальванометры ГБ-IV-BC-15 или ГБ-IV-BC-10 (Аппаратура...1974). Сейсмические каналы имели стандартную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). В качестве исходных параметров принимались:

- собственный период сейсмометра $T_s = 1,2c$;
- постоянная затухания сейсмометра $D_s = 0,4$;

- собственный период гальванометра $T_g = 0,075$ с;
- постоянная затухания гальванометра $D_g = 5,8$;
- коэффициент связи $\sigma^2 < 0,15$.

Так как период гальванометров изменялся в пределах 0,06-0,08 с, то АЧХ имели большой разброс. После проведения стандартизации частотных характеристик сети сейсмических станций Камчатки стали идентифицироваться парциальные параметры гальванометров $2D_g \cdot T_g = 0,81$, что значительно уменьшило разброс АЧХ (*Феофилактов, Гордеев, 1976*). Сквозная калибровка сейсмических каналов осуществлялась с помощью механического генератора (МГПА) с интегрирующей ячейкой. Постоянное по амплитуде напряжение частотой $0,5 \pm 20$ Гц подавалось на сопротивление затухания, стоящее в цепи калибровочной обмотки катушки сейсмоприемника. Особенности применения этого метода калибровки описаны в работе (*Феофилактов, Гордеев, 1976*).

В полевых комплектах в 70^х годах применялась гальванометрическая регистрация с помощью шлейфовых осциллографов ОСБ-I или ОСБ-IV. Начиная с 1978 г., в качестве регистраторов использовались перописующие приборы типа Н327 или Н3021 с чувствительностью $1 \div 500$ мВ/см. В этом случае сигнал от микробарографа или сейсмометра через трехканальный усилитель постоянного напряжения (УПН-III) подавался на перописующий регистратор. Чувствительность каналов УПН-III регулировалась 9-ступенчатым аттенюатором с кратностью 1,8.

2.4. Методика наблюдений и обработки сигналов

С целью уменьшения ветровых помех в пунктах регистрации микробарографы размещались в асбестоцементных трубах и подвешивались на резиновых жгутах для развязки с колебаниями грунта. При регистрации АС стратегия наблюдений строилась так, чтобы при минимальном количестве измерительных каналов получать информацию о скоростях распространения АС и азимуте его прихода. С этой целью во время регистрации ставились профильные и трехточечные расстановки приборов. Элементы расстановок определялись методом линейной триангуляции. Точность линий между приборами составляла ± 5 м, а высот расположения точек регистрации ± 2 м. Методика определения азимута прихода звукового луча была основана на измерении разности моментов прихода одной и той же фазы волны через три точки регистрации (*Монахов и др., 1959*). Если фронт звукового луча MN (рис.2.5) последовательно приходит в пункты 1, 2, 3 в моменты времени t_1, t_2, t_3 с одной и той же скоростью v , направление распространения фронта звуковой волны может быть выражено через угол β ,

который, в свою очередь, определяется через элементы расстановки микробарографов следующим образом:

$$\operatorname{ctg} \vartheta = \frac{L_{12}}{L_{13}} \cdot \frac{t_3 - t_1}{t_2 - t_1} \cdot \frac{1}{\sin \delta} - \operatorname{ctg} \delta.$$

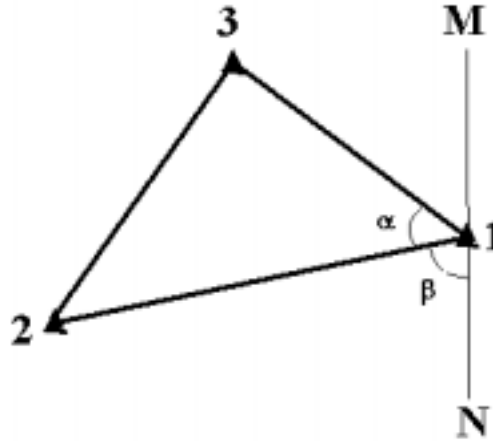


Рис. 2.5. Схема трехточечной микробарографической станции.

Зная направление прихода звукового луча и скорость звука в пункте регистрации, можно определить угол падения звукового луча:

$$L'_{12} = L_{12} \cdot \sin \vartheta ; \cos \vartheta = \frac{v(t_2 - t_1)}{L'_{12}} \quad \text{или} \quad L'_{13} = L_{13} \cdot \sin \vartheta ; \cos \vartheta = \frac{v(t_3 - t_1)}{L'_{13}}.$$

Как известно, на распространение звукового луча сильно влияет стратификация атмосферы, т.е. изменение температуры, скорости и направления ветра с высотой. На больших расстояниях от источника звука измеренные уровни могут существенно отличаться как в большую, так и особенно в меньшую сторону от тех значений, которые можно было ожидать вследствие геометрического расхождения. Это объясняется тем, что звуковой луч в зависимости от знака градиента скорости (Ω) преломляется или по направлению к земной поверхности, или от неё. В случае $\Omega > 0$ (температурная инверсия или рост скорости ветра с высотой) образуется теньевая зона, в которую прямая волна не попадает.

Для оценки градиента скорости и средней скорости распространения звука строились скоростные разрезы тропосферы, исходя из предположения о её горизонтальной однородности. Скорость на высоте H находилась по формуле:

$$C_H = 20,1 \sqrt{273 + t_H} \pm v_H \cos(\delta - \varphi_H),$$

где t_H , V_H , φ_H – температура, скорость, азимут ветра на высоте H , α – азимут от источника на пункт приёма. Использовались данные радиозондирования атмосферы в пос. Ключи.

Благодаря поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № РФФИ №95-07-19196) большое количество аналоговых записей зарегистрированных акустических и сейсмических сигналов были оцифрованы и занесены в базу данных (*Фирстов, Филиппов 1997*), что позволило применять к обработке сигналов современные пакеты прикладных программ. Использовались программы ПОС (пакет обработки сигналов фирмы «МЕРА»), MESOSAUR, STATISTICA.

Для спектрального анализа акустических и сейсмических сигналов использовалось весовое окно Ханнинга:

$$W_i = 0,5 * (1 - \cos(2i/N)); \quad i = 0, \dots, N-1,$$

где N – число дискретных отчетов взвешиваемого процесса. Это окно имеет оптимальные показатели и минимальные потери преобразования по сравнению с другими типами окон (прямоугольное, Блэкмана –Харриса, Flat Top, треугольное).