УДК 550.34

### Исследования и измерения характеристик высокочувствительных сейсмоприёмников на экспериментальной базе «Обнинск»

#### © 2024 г. А.Ю. Эльтеков<sup>1</sup>, О.А. Герасимчук<sup>1</sup>, П.М. Уткин<sup>1</sup>, Ю.А. Виноградов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «ВНИИА», г. Москва, Россия; <sup>2</sup>ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия

#### Поступила в редакцию 22.02.2024 г.

Аннотация. Уменьшение удовня собственного шума и нелинейных искажений каналов сейсмоприёмников являются одними из основных направлений совершенствования сейсмоприёмников для различных систем сейсмологического мониторинга. В соответствии с современными требованиями к высокочувствительным сейсмическим станциям собственный шум сейсмоприёмников должен быть, по крайней мере, в 3 раза меньше уровня местного сейсмического фона. Согласно расчётным оценкам, современные высокочувствительные сейсмоприёмники обеспечивают высокий уровень своих характеристик: собственный шум ниже минимального сейсмического фона, нелинейность не более 0.01%. Тем не менее, проблема экспериментальных оценок этих параметров в условиях постоянного действующего сейсмического фона требует решения. Это имеет большое значение при разработке и производстве сейсмоприёмников нового поколения. В работе приводятся результаты исследований и измерений характеристик собственного шума и нелинейных искажений высокочувствительных широкополосных и короткопериодных сейсмоприёмников, выполненных на экспериментальной базе «Обнинск» ФИЦ ЕГС РАН. Отмечается, что благодаря стабильной температуре в штольне и модернизированным методикам измерений удаётся получить достаточно точные оценки характеристик высокочувствительных сейсмоприёмников. В зависимости от текущего уровня сейсмического фона в штольне неопределённость результатов измерений средних квадратических значений собственного шума сейсмоприёмников в полуоктавных диапазонах частот на уровне и ниже уровня модели минимального сейсмического шума составляет 20–30%. Показано, что использование расчётных значений тестовых синусоидальных сигналов, вычисленных по максимуму спектра, обеспечивает абсолютную неопределённость измерения коэффициента нелинейных искажений порядка 0.0004%. Условия экспериментальной базы «Обнинск» обеспечивают возможность выполнения измерений собственных шумов и нелинейных искажений высокочувствительных сейсмоприёмников с удовлетворительной точностью. Экспериментальная база «Обнинск» служит одним из возможных мест для проведения исследований характеристик и технического контроля современных сейсмических приборов.

Ключевые слова: сейсмоприёмник, аппаратурный шум, нелинейность, сейсмический фон, неопределённость.

Для цитирования: Эльтеков А.Ю., Герасимчук О.А., Уткин П.М., Виноградов Ю.А. Исследования и измерения характеристик высокочувствительных сейсмоприёмников на экспериментальной базе «Обнинск» // Российский сейсмологический журнал. – 2024. – Т. 6, № 2. – С. 52–69. – DOI: https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.2.04. – EDN: RMYBBU

#### Введение

Основными направлениями в совершенствовании сейсмоприёмников для различных систем сейсмологического мониторинга [*Кишкина и др.*, 2021; *Thomas et al.*, 2020] являются расширение частотного диапазона, снижение собственных шумов измерительных каналов, уменьшение нелинейных искажений в каналах регистрации. Согласно современным требованиям к сейсмическим станциям [*Старовойт*, *Барриентос*, 2005] уровень собственного шума сейсмоприёмников должен быть, по крайней мере, в 3 раза меньше уровня местного сейсмического фона, нелинейные искажения в каналах регистрации – 0.1% и менее. По расчётным оценкам, современные высокочувствительные сейсмоприёмники имеют высокие показатели: собственный шум ниже минимального сейсмического фона, нелинейные искажения не более сотых долей процента [*Bashilov et al.*, 2022; *Short-period* ..., 2024; *Dai et al.*, 2015]. При этом остаётся открытым вопрос об экспериментальной оценке характеристик сейсмоприёмников в условиях воздействия естественного и техногенного сейсмического шума.

Особенно остро вопрос об экспериментальном подтверждении характеристик стоит при разработке новых сейсмоприёмников и организации их серийного выпуска с необходимостью периодического допускового контроля качества изготовления. В 2016–2021 гг. во ВНИИА был разработан и изготовлен ряд высокочувствительных сейсмоприёмников (коэффициент преобразования 2000–20000 *В*·с·*м*<sup>-1</sup>), в т.ч. сейсмоприёмник трёхкомпонентный широкополосный (СТШ) типа ТБСЦ5 и сейсмоприёмник короткопериодный вертикальный (СКВ) ТБСЦ6 [*Bashilov et al.*, 2022].

Основными источниками неопределённости [*ГОСТ*, 2012] результатов экспериментальных оценок характеристик сейсмоприёмников являются сейсмический фон, достигающий единиц микрометров в секунду в городских условиях, и дестабилизирующие факторы, главным образом изменения температуры окружающего воздуха, а также неравновесные тепловые и механические процессы в конструкции сейсмоприёмников.

Одним из путей повышения точности оценок характеристик высокочувствительных сейсмоприёмников является выполнение измерений в заглублённых помещениях (штольнях) или в скважинах. При надлежащем выборе места уже при глубине установки испытуемого сейсмоприёмника (ИС) более 10 м отмечается удовлетворительное снижение тепловых и конвекционных потоков, а при надлежащем выборе места проведения экспериментов - значительное снижение сейсмического фона по сравнению с производственными условиями. Кроме того, в целях повышения точности измерений применялась узкополосная цифровая полосовая фильтрация записей [Эльтеков и др., 2004], позволяющая уменьшить влияние сейсмического фона на неопределённость результатов измерений.

В США тестирование сейсмоприёмников проводится в Альбукеркской лаборатории (Нью-Мексико). Ранее в СССР подходящим местом служила экспериментальная база «Боровое» (Казахстан), где были получены достаточно точные результаты. В связи с необходимостью отработки и проверок новых типов высокочувствительных сейсмоприёмников, целью выполненных исследований являлась экспериментальная проверка возможности их тестирования на территории России.

Экспериментальные исследования и измерения характеристик разработанных сейсмоприёмников проводились в подземном сооружении – инструментальной шахте ФИЦ ЕГС РАН в г. Обнинске [Старовойт, 2017] в соответствии с договором о научно-техническом сотрудничестве. Шахта была построена в 1964 г., в 2008 г. в ней была произведена реконструкция. Подземное сооружение выполнено в форме сплошной железобетонной конструкции, монолитно связанной с коренной породой, расположено в целиковом массиве плотного мраморовидного известняка, включает в себя два вертикальных ствола, соединённых горизонтальным коридором длиной 100 м, ориентированным по меридиану. Глубина шахты составляет 30 м. В каждом стволе имеются лестницы, а в главном южном стволе оборудован грузопассажирский лифт. В средней части коридора имеются боковые ответвления длиной 50 м на запад и восток. По сторонам коридоров располагаются 18 изолированных камер, оборудованных герметичными дверьми, площадью от 30 до 50 м<sup>2</sup> с бетонными постаментами размером 1000±1500 мм, изолированными от пола сооружения, предназначенными для размещения сейсмической аппаратуры (рис. 1). В камерах поддерживается естественная устойчивая температура +8°C с сезонными вариациями, не превышающими 1°С. С целью обеспечения гидроизоляции шахты все внутренние поверхности помещений покрыты эпоксидной смолой и гидроизолирующим цементом [Попов, Старовойт, 1971]. Основное назначение шахты состоит в обеспечении защиты сейсмических датчиков от непосредственного воздействия ветровых нагрузок, колебаний температуры, атмосферного давления и сейсмических шумов природного и техногенного происхождения. Вокруг подземного сооружения имеется зона отчуждения радиусом 500 м, в пределах которой ограничена техногенная активность. Уровень сейсмического фона в штольне на 16−20 дБ ниже уровня сейсмического фона на поверхности.



Рис. 1. Оборудование, размещённое на постаменте в камере подземного сооружения

#### Измерения нелинейных искажений

#### Метод исследований

Методы измерений нелинейных искажений сейсмоприёмника основаны на вычислении амплитуд гармоник тестового сигнала на выходе канала регистрации [*Рубичев*, 1978] при подаче на его вход синусоидального сигнала. В условиях повышенного сейсмического фона для снижения его влияния на результаты измерений амплитуд гармоник используется метод наименьших квадратов (МНК). Вычисление амплитуды *A*, *отсч.*, оцифрованного синусоидального сигнала  $\{X_k\}$  *k*=1,2...*N*, измеренных с частотой дискретизации *Fd*, согласно МНК производится следующим образом. Сигнал на выходе представляющег:

$$X_{\mu} = A_{1} \cdot \sin(2\pi k \cdot Fc/Fd) + A_{2} \cdot \cos(2\pi k \cdot Fc/Fd).$$
(1)

Значения  $A_1$  и  $A_2$  вычислялись решением системы уравнений:

$$a_{11} \cdot A_1 + a_{12} \cdot A_2 = b_1,$$
  
$$a_{21} \cdot A_1 + a_{22} \cdot A_2 = b_2,$$
 (2)

 $\begin{aligned} & \text{Fige } a_{11} = \sum \sin^2(2\pi k \cdot Fc/Fd); \\ & a_{12} = \sum \sin(2\pi k \cdot Fc/Fd) \cdot \cos(2\pi k \cdot Fc/Fd); \\ & b_1 = \sum X_k \cdot \sin(2\pi k \cdot Fc/Fd); \\ & a_{21} = a_{12}; \\ & a_{22} = N - a_{11}; \\ & b_2 = \sum X_k \cdot \cos(2\pi k \cdot Fc/Fd). \end{aligned}$ 

Амплитуда гармонического сигнала *A*, *отсч*., по МНК определяется по формуле:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \ . \tag{3}$$

Традиционно измерения нелинейности амплитудной характеристики проводятся методом одного тона по гармоникам высшего порядка. Однако измерение нелинейности амплитудных характеристик менее 0.1% по методу одного тона затруднено ввиду наличия кратных гармоник в источнике синусоидальных сигналов и большой погрешности измерения малых амплитуд гармоник при калибровке сейсмоприёмников генераторным способом [Володин и др., 1985]. Интермодуляционный метод, основанный на использовании тестового двухчастотного (бигармонического) сигнала, свободен от этого недостатка [Рубичев, 1978], тем не менее сейсмический фон на месте проведения измерений не должен иметь значительных спектральных составляющих на частоте суммарной частоты. Коэффициент интермодуляции К<sub>ни</sub> рассчитывается по формуле:

$$K_{\rm HM} = \frac{A(f_1 + f_2)}{A(f_1) + A(f_2)} \cdot 100, \qquad (4)$$

где A(f) — амплитуда гармоники на частоте f, *отсч*.;

 $f_1, f_2$  — частоты тестовых синусоидальных сигналов,  $\Gamma \mu$ .

Точность оценок амплитуды синусоидального сигнала по формулам (1)—(3) существенно зависит от точности задания частоты формируемого сигнала. С целью уменьшения неопределённости результата измерений оценка фактической частоты основной гармоники, оцифрованного синусоидального сигнала с заданной на генераторе номинальной частотой  $Fc_{gen}$  и представляющего собой N дискретных значений сигнала { $X_k$ }

k=1,2..N, измеренных с частотой дискретизации *Fd*, производится в два этапа:

а — предварительная оценка значения частоты основной гармоники Fc,  $\Gamma \mu$ , выполняется путём вычисления средневзвешенного значения частоты максимума спектральной плотности мощности набора  $\{X_k\}$  в окрестности установленной на генераторе частоты  $Fc_{een}$  по формулам:

1

$$\begin{cases} F_{c} = \frac{\sum_{i=0}^{2 \cdot n} P_{x}(f_{i-n+1}) \cdot f_{i-n+1}}{\sum_{i=0}^{2 \cdot n} P_{x}(f_{i-n+1})} \\ f_{i+1} - f_{i} = \frac{Fd}{N} \\ \sigma_{sp}(F_{c}) = \max\left(\frac{Fd}{N}, \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{2 \cdot n} P_{x}(f_{i-n+1}) \cdot (F_{c} - f_{i-n+1})^{2}}{2 \cdot n \cdot \sum_{i=0}^{2 \cdot n} P_{x}(f_{i-n+1})}}\right) \end{cases}$$
(5)

где  $P_x$  — спектральная плотность мощности набора  $\{X_k\}$ ,  $(omcu.)^2/\Gamma u;$ 

 $f_{\rm n}$  — частота, соответствующая максимуму  $P_{\rm x}$  в окрестности частоты  $Fc_{\rm gen}$  ( $f_{\rm n} \cong Fc_{\rm gen}$ ), Iu;

n — количество используемых для расчёта *Fc* дискретных значений  $P_x$  слева и справа от максимального значения ( $n \le 3$ ), *шт.*;

 $\sigma_{sp}(Fc)$  — предел абсолютной неопределённости оценки частоты максимума спектральной плотности, *Гц*;

6 — окончательная оценка частоты основной гармоники производится по значению частоты синусоидального сигнала из ряда  $\{F_i\}, i=1..M$  (M=57) в окрестности частоты Fc, для которой среднее значение амплитуды, полученное по трём вычисленным значениям амплитуд (на текущей и двух соседних частотах ряда), максимальна. Значения частот ряда  $\{F_j\}$  и значения амплитуд из ряда средних значений  $\{A_{mean}(F_k)\}$  определяются соотношениями:

$$\begin{cases} F_{1} = Fc - 1.4 \cdot \sigma_{sp} \left( Fc \right) \\ F_{i+1} - F_{i} = \frac{\sigma_{sp} \left( Fc \right)}{20 \cdot Fc} \\ F_{M} = Fc + 1.4 \cdot \sigma_{sp} \left( Fc \right) \\ A_{mean} \left( F_{k} \right) = \frac{A(F_{k-1}) + A(F_{k}) + A(F_{k+1})}{3} \\ k = 2..M - 1 \end{cases}$$
(6)

Амплитуды синусоидального сигнала на частотах  $F_i$  (*i*=1..*M*) вычисляются по формулам (2) и (3).

#### Неопределённость измерений нелинейности

Неопределённость измерения коэффициента интермодуляции  $K_{\rm HII}$  по применённой методике определяется уровнем микросейсмического фона и аппаратурного шума (далее уровень шума, шум) относительно амплитуд основных и суммарной гармоник.

Так как  $K_{\rm Hu}$  является относительной величиной и его расчёт производится по наборам данных, полученных по одному и тому же каналу регистратора, можно не учитывать следующие факторы, влияющие на неопределённость измерения амплитуд синусоидальных сигналов:

 погрешность (неопределённость) цены наименьшего разряда кода (ЦНРК) канала регистратора;

 погрешности (неопределённости) амплитуд синусоидальных сигналов, сформированных генераторами синусоидальных сигналов (ГСС).

В процессе вычислений производится автоматическая оценка фактических значений частот входных синусоидальных сигналов, поэтому погрешность задания ГСС частот входных синусоидальных сигналов можно не учитывать.

Нелинейные искажения входных синусоидальных сигналов, вырабатываемых ГСС, проявляются на гармониках, кратных частоте контрольных сигналов ( $2f_1$ ,  $2f_2$  и т.д.), но не влияют на амплитуду гармоник суммарной или разностной частоты. Следовательно, их также можно не учитывать при оценке неопределённости измерений.

В итоге при расчёте предела расширенной относительной неопределённости измерения коэффициента интермодуляции  $\delta_{KHH}$ , %, учитываются следующие неопределённости измерений и вычислений:

а –  $\delta_{\text{поізе}}(\Delta F_i)$  – расширенный предел относительной неопределённости измерения амплитуды синусоидального сигнала заданной частоты  $F_i$  $(F_1=f_1, F_2=f_2, F_3=f_1\pm f_2)$  на выходе сейсмоприёмника, обусловленный шумом в окрестности  $\Delta F_i$ , %, с доверительной вероятностью P=0.95;

 $6 - \delta_N(F_i)$  — расширенный предел относительной неопределённости вычисления амплитуды синусоидального сигнала заданной частоты  $F_i$  на выходе сейсмоприёмника, обусловленный размером *N*, *отсч.*, выборки данных регистрации, %, с доверительной вероятностью *P*=0.95;

 $B - \delta_{AFi}$  – предел относительной неопределённости вычисления амплитуды синусоиды частоты  $F_i$  методом МНК, связанной с неопределённостью измерения частоты синусоиды и количеством периодов синусоиды.

Вычисление границ расширенной относительной неопределённости  $\delta_{\text{Кни}}$ , %, измерения коэффициента интермодуляции для основных гармоник  $f_1$  и  $f_2$  и суммарной (разностной) гармоники  $f_3$ ,  $I_4$ , производится по формуле:

$$\delta_{\mathrm{KH}\mu} = U \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{3} \left( \left( \frac{\delta_{\mathrm{noise}} (\Delta F_{i})}{U} \right)^{2} + \left( \frac{\delta_{\mathrm{N}} (F_{i})}{U} \right)^{2} + \delta_{\mathrm{AF}i}^{2} \right)}, (7)$$

где *U* – значение квантиля (*U*=1.96 для нормального закона распределения при *P*=0.95).

Вычисление  $\delta_{\text{noise}}(F_i)$  производится по данным регистрации отклика сейсмоприёмника на тестовый сигнал. Для оценки уровня шума используются участки записи (в частотной области) в окрестности частоты  $F_i$ , исключая спектральный пик на частоте  $F_i$ .

Вычисления значений спектральных пиков производились по набору мгновенных значений  $\{X_k\}$  k=1,2..N, полученных из набора мгновенных значений оцифрованного сигнала  $\{X_k\}$ ' путём их поэлементного умножения на оконную функцию (спектральное окно) Блэкмана по формуле:

$$\{X_{k}\} = \{X_{k}\} \cdot \frac{\{W_{b}(k)\}}{mean(\{W_{b}(k)\})}, \qquad (8)$$

где  $W_{\rm b}(k)$  — оконная функция Блэкмана, вычисляемая по формуле:

$$W_{\rm b}(k) = 0.42 - 0.5 \cdot \cos\left(\frac{2\pi k}{N-1}\right) + 0.08 \cdot \cos\left(\frac{4\pi k}{N-1}\right); \quad (9)$$

*mean* — функция вычисления среднего набора значений, определяемая формулой:

$$mean\{X_{k}\} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^{N} \{X_{k}\}.$$
 (10)

Вычисления значений спектральных пиков проводились в три этапа.

Этап 1 – Определение границ участков спектра.

Для оценок уровня шума в области каждого спектрального пика используются области спектра справа и слева от пика, лежащие в границах от 0.25 ( $gr_025$ ) до 0.75 ( $gr_075$ ) расстояния между соседними пиками или от 0.02 до 0.05 значения частоты гармоники, с учётом ширины пика.

Для каждого из спектральных пиков на частоте  $F_i$  определяются параметры границ участков по формуле:

$$\begin{cases} lep\_bnd = \frac{K_{ush} \cdot Fd}{N} \\ gr\_025 = 0.25 \cdot \Delta F \\ gr\_075 = 0.75 \cdot \Delta F \\ \Delta F = F_2 - F_1 \end{cases}$$
(11)

где *lep\_bnd* — полуширина спектрального пика, *Гц*;

*N* – количество мгновенных значений в данных регистрации;

 $K_{\text{ush}}$  — коэффициент уширения пика в результате применения окна Блэкмана типа (9),  $K_{\text{ush}}$ =3.

Нижняя (low\_left) и верхняя (high\_left) границы левой области и нижняя (low\_right) и верхняя правая (high\_right) границы правой области каждого пика (рис. 2) на частотах  $F_1$  и  $F_2$  (первые гармоники),  $F_4$  и  $F_5$  (вторые гармоники, обусловленные нелинейностью генераторов) и  $F_3$  (гармоника суммарной частоты),  $I_4$ , определяются по формулам:

$$\begin{cases} high\_left = \min(0.98 \cdot F_{i}; F_{i} - lep\_bnd) \\ low\_left = high\_left - 0.05 \cdot F_{i} \\ low\_right = \max(F_{i} + gr\_025; F_{i} + lep\_bnd) \\ high\_right = \min(low\_right + 0.05; F_{i} + gr\_075) \end{cases}$$

для 
$$F_1$$
 и  $F_4$ . (12)

$$high\_left = \min(F_{i} - gr\_025; F_{i} - lep\_bnd)$$

$$low\_left = \max(F_{i} - \Delta F + lep\_bnd; F_{i} - gr\_075)$$

$$low\_right = \max(1,02 \cdot F_{i}; F_{i} + lep\_bnd)$$

$$high\_right = low\_right + 0,05 \cdot F_{i}$$

для 
$$F_2$$
 и  $F_5$ . (13)

Этап 2 – Оценка среднего уровня фона.

Оценка среднего уровня фона для частоты  $F_i$  производилась с использованием среднего значения спектральной плотности мощности *S* записи бигармонического сигнала на участках, полученных по формулам (12)–(14) для данной частоты, по формулам:

$$S = \frac{\sum_{k=1}^{N_1} \{ P_X(k) \}_{left}}{N_1} + \frac{\sum_{k=1}^{N_2} \{ P_X(k) \}_{right}}{N_2}, \quad (15)$$
$$A_{noise} = \sqrt{\frac{2 \cdot S \cdot Fd}{N}}, \quad (16)$$

где  $N_1$ ,  $N_2$  — количество значений спектральной плотности мощности в левой и правой области соответственно;



Рис. 2. Пример амплитудного спектра бигармонического сигнала, прошедшего нелинейный элемент

 $F_1$  и  $F_2$  — первые гармоники синусоидальных сигналов генераторов;  $F_3$  — гармоника суммарной частоты;  $F_4$  и  $F_5$  — вторые гармоники, обусловленные нелинейностью генераторов

*Fd* — частота дискретизации данных регистрации, *Гц*;

*N* – количество мгновенных значений в данных регистрации;

 $A_{\text{noise}}$  — оценка амплитуды приведённого к выходу сейсмоприёмника синусоидального сигнала, формируемого шумом на частоте  $F_i$ , которая могла быть получена при её вычислении методом МНК, *B* (далее — амплитуда шума);

 ${P_{X}}_{left}, {P_{X}}_{right}$  — наборы значений спектральной плотности мощности в левой и правой области соответственно,  $B^{2}/\Gamma \mu$ .

Этап 3 – Вычисление  $\delta_{\text{noise}}(\Delta F_i)$ .

Вычисление  $d_{noise}(\Delta F_i)$  производится по формуле:

$$\delta_{\text{noise}}\left(\Delta F_{\text{i}}\right) = \frac{100 \cdot U}{\max\left(A(F_{\text{i}}), A_{\text{noise}}\right)} \cdot \sqrt{\left(Z_{0.95}^{\text{B}}\left(N_{1} + N_{2} - 1\right) \cdot A_{\text{noise}}\right)^{2} + \left(\frac{t_{0.95}\left(N_{1} + N_{2} - 1\right) \cdot A_{\text{noise}}}{U \cdot \sqrt{N_{1} + N_{2} - 1}}\right)^{2}}, \quad (19)$$

где  $A(F_i)$  – амплитуда приведённого к выходу сейсмоприёмника тестового синусоидального сигнала на частоте  $F_i$ , B, вычисленная по формуле (16);

 $Z_{0.95}^{B}(k)$ ,  $t_{0.95}(k)$  – множители для P=0.95 при  $k=N_{1}+N_{2}-1$  для нормального закона распределения;

 $A_{\text{noise}}$  – амплитуда шума, вычисленная по формуле (16) для частоты  $F_{\text{i}}$ .

Вычисление  $\delta_N(F_i)$  производится по формуле:

$$\delta_{N}(F_{i}) = 100 \cdot U \cdot \left(\sqrt{\left(Z_{0.95}^{B}(N-1)\right)^{2} + \left(\frac{t_{0.95}(N-1)}{U \cdot \sqrt{N}}\right)^{2}} - 1\right),$$
(20)

где N – количество мгновенных значений в данных регистрации.

РОССИЙСКИЙ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. 2024. Т. 6. № 2

 $\{P_{x}\}_{left}$  и  $\{P_{x}\}_{right}$  вычисляются по формуле:

$$P_{\rm X}({\rm k}) = \frac{2 \cdot \Delta^2}{Fd \cdot N} \cdot \left| X \left( 2\pi \cdot j \cdot f_{\rm k} \right) \right|^2, \qquad (17)$$

где  $\Delta$  – ЦНРК канала регистратора, *B*;  $X(2\pi j f_k)$  – вектор, *отсч.*, полученный из набора  $\{x_i\}$  дискретным преобразованием Фурье (ДПФ) по алгоритму БПФ по формуле:

$$X(2\pi \cdot j \cdot f_{k}) = \sum_{n=1}^{N} x_{n} e^{-2\pi \cdot j \cdot \frac{kn}{N}} = \mathcal{J} \Pi \Phi_{N} \{x_{n}\}$$
(18)

Вычисление  $\delta_{AFi}$  производится по эмпирической формуле:

$$\delta_{\mathrm{AF}_{i}} = 100 \cdot \left[ \left( \cos \left( \frac{\pi}{4} \cdot \min \left( 2, \frac{np \cdot \delta(F_{i})}{100} \right) \right) \right)^{1.6} - 1 \right], \tag{21}$$

где min(...) – функция определения минимального значения;

np — количество периодов синусоиды частоты  $F_i$  в данных регистрации бигармонического сигнала размером N, *отсч.*, и частотой дискретизации Fd,  $\Gamma u$ , вычисляемое по формуле:

$$np = \frac{N}{Fd} \cdot F_{\rm i}; \tag{22}$$

 $\delta(F_i)$  – относительная неопределённость оценки частоты синусоиды, %, вычисляемая по формуле:

$$\delta(F_{i}) = \frac{\Delta(F_{i})}{F_{i}} \cdot 100 = \frac{0.025 \cdot \sigma_{sp}(F_{i})}{F_{i}} \cdot 100, i = 1, 2,$$
(23)

$$\delta(F_3) = \frac{0.025 \cdot \sqrt{\sigma_{sp}^2(F_1) + \sigma_{sp}^2(F_2)}}{F_3} \cdot 100, \qquad (24)$$

где  $\Delta(F_i)$  – абсолютная неопределённость определения частоты синусоиды по формуле (6),  $\Gamma \mu$ ;  $\sigma_{sp}(F_i)$  – расширенный предел абсолютной неопределённости оценки частоты максимума спектральной плотности, вычисленный по формуле (5),  $\Gamma \mu$ .

Результаты измерения  $K_{\rm HИ}$  по формуле (10) представляются в следующей форме:  $K_{\rm HII}$ =XX%;  $\delta=\pm$ YY%; P=0.95, где вместо XX указывается полученное значение  $K_{\rm HII}$ , вместо YY указывается этся значение вычисленного предела расширенной относительной неопределённости. Если значение  $\delta$  составляет более 20% от значения  $K_{\rm HII}$ , то результаты измерения представляются в форме:  $K_{\rm HII}$  не более (XX+YY)%; P=0.95 [Уткин, Кожевников, 2019; 2021a; 2021b].

#### Выполнение измерений нелинейности

В состав оборудования для измерения нелинейных искажений интермодуляционным методом согласно разработанной методике (Свидетельство об аттестации № Т0071-19/22-081. RA.RU.311806-2020) входят: два ГСС типа Agilent 33220A, сумматор сигналов, регистратор трёхканальный REFTEK130B и ЭВМ (ноутбук). Питание осуществлялось от источника постоянного тока GPS-3303.

Оба ГСС подключались к входам сумматора и суммарный сигнал подавался на калибровочную катушку ИС. Выходной сигнал ИС поступал на вход регистратора, где осуществлялось аналого-цифровое преобразование с частотой дискретизации 40 или 100 *Гц* и передача цифровых отсчётов в ЭВМ.

Измерения проводились в следующем порядке. ИС устанавливался в штольне на бетонном постаменте на глубине 30 *м* и выдерживался во включённом состоянии в течение суток. Коэффициенты преобразования сейсмоприёмника и ЦНРК каналов регистрации на частотах тестовых сигналов уточнялись на месте непосредственно перед измерениями генераторным способом по методике измерений относительных значений амплитудно-частотной характеристики сейсмоприёмников (Свидетельство об аттестации № Т0071-19/22-083. RA.RU.311806-2020) с неопределённостью не более 0.1% [Уткин, Кожевников, 2019; 2021а; 2021b].

Амплитуды тестовых синусоидальных сигналов определялись калибровочными постоянными сейсмоприёмников и задавались таким образом, чтобы выходной суммарный сигнал не превышал диапазон преобразования. Частоты тестовых сигналов, задаваемые на ГСС, составляли  $f_1=1.0 \ \Gamma \mu \ u \ f_2=1.1 \ \Gamma \mu$ . Минимальная продолжительность регистрации  $t_{\min\_ism}$ , c, составляла не менее 1000 c при условии, что частота дискретизации данных составляла не менее 5 крат от значения частоты суммарной гармоники.

С помощью ЭВМ по заранее определённому значению цены наименьшего разряда цифрового кода (ЦНРК) регистратора вычислялись амплитуды гармоник  $A(f_1)$ ,  $A(f_2)$  и  $A(f_1+f_2)$  на выходах ИС в размерности электрического напряжения и производился расчёт коэффициента нелинейности по формуле (4). В качестве оценок амплитуд принимались средние значения по серии наблюдений. Проверки каналов «сумматоррегистратор» по аналогичной процедуре показали, что при продолжительности измерений 3 час. их коэффициент нелинейности (коэффициент интермодуляции) составляет не более 0.0001%.

#### Результаты измерений нелинейных искажений

Измерения нелинейности амплитудных характеристик сейсмоприёмников проводились в разное время камерах № 1 и № 4 штольни «Обнинск». Для снижения влияния сейсмического фона измерения проводятся, как правило, в ночное время в период минимальных городских помех. Перед началом и после завершения измерений выполнялись контрольные оценки среднего квадратического значения (СКЗ) сейсмического фона в диапазоне частот 1.9–2.2 Гц.

При обработке записей тестовых сигналов по формулам (5) и (6) установлено, что фактические значения частот тестовых синусоидальных сигналов отличаются до 0.0003%, что при продолжительности регистрации порядка 8 час. могло привести значительному фазовому сдвигу и к методической погрешности оценок коэффициента нелинейных искажений более 50%. Использование уточнённых значений частоты *Fc* в формуле (1) позволило уменьшить методическую погрешность измерений.

Результаты измерений коэффициентов нелинейных искажений вертикальных и горизонтальных каналов сейсмоприёмников приведены в табл. 1. Расчёты по формуле (4) дали следующие оценки коэффициентов нелинейных искажений: для СКВ — не более 0.004%, для вертикальных каналов – не более 0.0003%, для горизонтальных каналов СТШ – не более 0.0006%.

Неопределённость оценок, вычисленная по формулам (19)–(24), составляла 7–20% относительно измеренных значений коэффициентов нелинейных искажений при высоком уровне тестовых сигналов и минимальном уровне сейсмического фона в штольне. С учётом неопределённости измерений верхние пределы экспериментальных значений коэффициентов нелинейных искажений в зависимости от уровня сейсмического фона составили 0.0004–0.0086%.

В ходе работ по отработке методики измерений коэффициента нелинейных искажений сейсмоприёмников установлено, что рекомендуемая длительность сеансов записи тестовых сигналов должна составлять 3-8 часов. Выполнение измерений в периоды минимального уровня сейсмического фона в диапазоне частот 1.9 до 2.2 Ги (не более 50 нм/с) обеспечивает получение оценок коэффициентов нелинейных искажений порядка 0.001-0.01% с неопределённостью не более 20% от измеренных значений.

Дальнейшее увеличение продолжительности регистрации тестовых сигналов (до 1–2 *сут.*) приводит к некоторому снижению относительной неопределённости, но целесообразно при измерениях коэффициентов нелинейных искажений сейсмоприёмников менее 0.001%.

Канал сейсмоприёмника	Короткопериодный вертикальный	Вертикальный широкополосный	Горизонтальный широкополосный
Амплитуда гармоники на частоте 1.0 <i>Гц</i> , <i>мкм/с</i>	16.6–21.3	16.6-811	75-748
Амплитуда гармоники на частоте 1.1 <i>Гц, мкм/с</i>	15.0-20.4	15.0-735	68–678
Амплитуда гармоники на частоте 2.1 <i>Гц, нм/с</i>	0.9–4.2	0.39–5.5	0.27-8.0
СКЗ фона в полосе частот 1.9–2.2 Гц, нм/с	26–39	39–68	48-89
Амплитуда гармоники на частоте 2.1 <i>Гц</i> , обусловленная фоном, <i>нм/с</i>	0.22-4.2	0.25–2.5	0.29–3.3
Длительность записи, час.	15-44	1-15	1–15
Коэффициент нелинейных искажений по формуле (4), %	0.0028-0.0044	0.0001-0.0003	0.0002-0.0006
Верхний предел оценки коэффициента нелинейных искажений с учётом неопределённости, %	0.0055–0.0086	0.0004-0.0007	0.0006-0.0008

Таблица 1. Результаты измерений коэффициентов нелинейных искажений

## Измерения собственного шума сейсмоприёмников

#### Метод измерений

При измерениях характеристик собственного шума сейсмоприёмников использовался метод компенсации [Жовинский, Араховский, 1974] с узкополосной цифровой фильтрацией. Основой метода компенсации применительно к измерениям собственного шума является исключение из сейсмических записей на выходе измерительного канала испытуемого прибора составляющих, коррелированных с сигналами на выходе канала регистрации контрольного сейсмоприёмника (КС). Этот метод обеспечил получение оценок СКЗ собственного шума с установкой сейсмоприёмников в скважинах при низком уровне сейсмического фона [Эльтеков и др., 2004]. В связи с повышенным уровнем сейсмического фона в районе расположения штольни «Обнинск» ранее использованная методика измерений была модернизирована путём применения методов спектрально-корреляционного анализа и узкополосных цифровых фильтров.

Сигналы на выходах ИС и КС представляются в виде сумм откликов на сейсмический фон и собственный шум. Если оси максимальной чувствительности ИС и КС взаимно параллельны, то, полагая, что передаточные характеристики ИС и КС идентичны, и сейсмический фон оказывает одинаковое воздействие на оба датчика, сигналы на выходах каналов регистрации, приведённые к выходам ИС и КС в момент времени *t* можно записать в виде:

$$\begin{cases} U_{\rm IS}(t) = Z(t) + \xi_{\rm IS}(t) \\ U_{\rm KS}(t) = Z(t) + \xi_{\rm KS}(t) \end{cases},$$
(25)

где  $U_{IS}(t)$ ,  $U_{KS}(t)$  – напряжение на выходах датчиков ИС и КС соответственно, *B*;

Z(t) – отклик датчиков на сейсмический фон, *B*;  $\xi_{IS}(t), \xi_{KS}(t)$  – собственный шум каналов регистрации ИС и КС соответственно, *B*.

Полагая, что собственные шумы ИС и КС, определяемые тепловым движением маятников и тепловыми флуктуациями тока в электрических цепях и активных элементах электронных усилителей, не коррелированы с сейсмическим фоном и между собой, соотношения между дисперсией и корреляцией сигналов на выходах ИС и КС, приведённых к входам ИС и КС, при длительности сигналов, стремящейся к бесконечности, выглядят следующим образом:

$$\begin{bmatrix}
D[U_{IS}] = D[Z] + D[\xi_{c,IS}] \\
D[U_{KS}] = D[Z] + D[\xi_{c,KS}] \\
D[Z] = M[U_{IS} \cdot U_{KS}] = K_{corr}[U_{IS}, U_{KS}] \cdot \sqrt{D[U_{IS}]} \cdot D[U_{KS}] \\
M[Z, \xi_{IS}] = M[Z, \xi_{c,KS}] = M[\xi_{c,IS}, \xi_{c,KS}] = 0$$
(26)

где *D*[...] – дисперсия;

M[...] — математическое ожидание;

 $K_{corr}[U_{1S}, U_{KS}]$  – коэффициент корреляции сигналов на выходах каналов регистрации ИС и КС.

Из формулы (26) следует, что выражение для СКЗ собственного шума ИС  $\sigma_{c_{-IS}}$  выглядит следующим образом:

$$\sigma_{c_{IS}} = \sqrt{\sigma_{IS}^2 - K_{corr} \cdot \sigma_{IS} \cdot \sigma_{KS}} = \sigma_{IS} \cdot \sqrt{1 - K_{corr} \cdot \frac{\sigma_{KS}}{\sigma_{IS}}}, \qquad (27)$$

где  $\sigma_{IS}$  – СКЗ отсчётов напряжений на выходе ИС, приведённые к его входу ИС, *м/c*;  $\sigma_{KS}$  – СКЗ отсчётов напряжений на выходе КС, приведённые к его входу, *м/c*.

Для конечных выборок сигналов с выходов ИС и КС по N пар отсчётов предельные (при  $N \rightarrow \infty$ ) соотношения (26), (27) вычисление СКЗ собственного шума принимает вид [Эльтеков и др., 2004]:

$$\sigma_{\rm IS} = \sqrt{\frac{\Delta_{\rm IS}^2}{(N-1) \cdot K_{\rm IS}^2}} \sum_{i=1}^{\rm N} U_{Hi}^2 - \left[\frac{\Delta_{\rm IS}}{N \cdot K_{\rm IS}} \sum_{i=1}^{\rm N} U_{\rm ISi}\right]^2 - \frac{1}{K_{\rm IS} K_{\rm KS}} \left[\frac{\Delta_{\rm IS} \cdot \Delta_{\rm KS}}{N} \sum_{i=1}^{\rm N} U_{\rm ISi} U_{\rm KSi} - \frac{\Delta_{\rm IS} \cdot \Delta_{\rm KS}}{N^2} \sum_{i=1}^{\rm N} U_{\rm ISi} \sum_{i=1}^{\rm N} U_{\rm KSi}\right], \quad (28)$$

где  $\sigma_{IS}$  — оценка СКЗ собственного шума ИС, приведённого к входу, в заданном поддиапазоне;  $\Delta_{IS}$  — ЦНРК регистратора по каналу «И»;

 $\Delta_{\rm KS}$  – ЦНРК регистратора по каналу «К»; N – количество пар отсчётов сигналов;  $K_{\rm IS}$  – коэффициент преобразования ИС;

 $U_{ISI}^{IS}$  – і значение цифрового кода регистратора по каналу «И»;

*K*<sub>кs</sub> – коэффициент преобразования КС;

 $U_{\rm KSi}-i$ значение цифрового кода регистратора по каналу «К».

Для современных цифровых 24-разрядных регистраторов, имеющих значения ЦНРК 1–2 *мкВ*, шумы квантования на один-два порядка меньше собственного шума сейсмоприёмников и в формуле (28) не учитываются.

Из формул (27) и (28) следует, что для измерения СКЗ собственного шума сейсмоприёмника при большом уровне сейсмического фона требуется обеспечить коэффициент близким к 1, что на практике ограничивается конечной степенью идентичности передаточных характеристик каналов ИС и КС. С целью обеспечения измерений при максимально возможном низком уровне сейсмического фона исследуемые полуоктавные частотные диапазоны суточных записей разбивались на 10-20 узких поддиапазонов частот и для каждого частотного поддиапазона выбирались фрагменты записей (не менее пяти) длительностью 1-10 мин. с минимальным уровнем регистрируемого сейсмического фона. По этим фрагментам вычислялись СКЗ собственного шума для соответствующего узкого поддиапазона частот по формуле (28), по которым, в свою очередь, путём суммирования дисперсий рассчитывались СКЗ собственного шума для полуоктавного диапазона частот. Так как сейсмический фон носит случайный нестационарный характер во времени и по частоте [Аки, Ричардс, 1983], а собственный шум сейсмоприёмников в установившемся режиме представляет собой стационарный процесс, удалось минимизировать влияние сейсмического фона на результаты измерений.

## Неопределённость оценок СКЗ собственного шума

Вычисление неисключённой систематической составляющей неопределённости измерений (*P*=0.95) осуществляется по приближенной формуле [Эльтеков и др., 2004]:

$$\theta \approx 0.55 \frac{\sigma_{\rm s}^2}{\sigma_{\rm IS}^2} \sqrt{\frac{\delta \varphi_{\rm op}^4}{4}} + \left(\varepsilon_{\rm A} + \frac{\delta_{\Phi}^2}{2}\right)^2 \cdot 100\% , \ (29)$$

где  $\theta$  — относительная систематическая составляющая неопределённости измерений, %;

 $\sigma_{s}$  — среднее значение сейсмического фона во время измерений;

 $\delta \phi_{op}$  — неопределённости взаимной ориентации осей максимальной чувствительности ИС и КС, *pad*;

 $\varepsilon_{A}$  — относительная погрешность определения отношения ЦНРК каналов регистрации для ИС и КС;

 $\delta_{\phi}$  — максимальная разность фазовых характеристик ИС и КС в узком поддиапазоне частот, *рад*.

Ориентация ИС и КС на постаменте выполняется по реперам на корпусах сейсмоприёмников вдоль натянутой нити. При этом непараллельность их осей чувствительности практически определяется конструктивной допусковой погрешностью ориентации осей сейсмодатчиков внутри корпуса (приблизительно 0.002 *pad*).

Определение отношения ЦНРК каналов регистрации для ИС и КС выполняется путём одновременной их калибровки от одного генератора с погрешностью не более 0.001 (0.1%).

Для компенсации разности фазовых характеристик ИС и КС в каждом узком поддиапазоне частот при вычислениях по формуле (28) используется максимум взаимной корреляционной функции выходных сигналов ИС и КС, что позволяет компенсировать разность групповых задержек выходных сигналов. Таким образом удаётся уменьшить неисключённую систематическую составляющую неопределённости измерений согласно формуле (29) до 20% (P=0.95) при отношении  $\sigma_s/\sigma_c$  не более 40  $\partial E$ .

Случайная составляющая неопределённости измерения (*P*=0.95) определяется по приближенной формуле [Эльтеков и др., 2004]:

$$\varepsilon_{_{\mathrm{CII}}} \approx \sqrt{\frac{2 + \left(\frac{\sigma_{_{\mathrm{S}}}}{\sigma_{_{\mathrm{IS}}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{_{\mathrm{KS}}}}{\sigma_{_{\mathrm{IS}}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{_{\mathrm{S}}}}{\sigma_{_{\mathrm{IS}}}}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma_{_{\mathrm{KS}}}}{\sigma_{_{\mathrm{IS}}}}\right)^2 + \frac{Fd}{\pi \cdot f_{_{\mathrm{B}}}}}{100\%},$$
(30)

где  $\varepsilon_{cn}$  – относительная случайная погрешность измерений СКЗ собственного шума сейсмоприёмника, %;

 $\sigma_{\rm KS}$  – СКЗ собственного шума контрольного сейсмоприёмника;

- $f_{_{\rm B}}$  верхняя граница частотного диапазона;
- *n* количество измерений;

*N* – число отсчётов в каждом наблюдении.

При выполнении измерений количество отсчётов N должно составлять не менее 15000, количество измерений n – не менее 5, что обеспечивает величину случайной составляющей неопределённости измерений в пределах 36% при отношении  $\sigma_{\rm s}/\sigma_{\rm c}$  40  $\partial E$  и 12% (P=0.95) при отношении  $\sigma_{\rm s}/\sigma_{\rm c}$  не более 30  $\partial E$ .

Оценка суммарной погрешности измерения (*P*=0.95) проводится по формуле [*Зайдель*, 1974]:

$$\theta_{_{\rm H3M}} = \sqrt{\theta^2 + \varepsilon_{_{\rm CJ}}^2} , \qquad (31)$$

где  $\theta_{_{\rm H3M}}$  – относительная погрешность измерения СКЗ собственного шума сейсмоприёмника, %;  $\theta$  – определяется по формуле (29);  $\varepsilon_{_{\rm CII}}$  – определяется по формуле (30).

#### Выполнение измерений собственного шума

В соответствии с модернизированной методикой измерений СКЗ собственного шума сейсмоприёмников (Свидетельство № Т0071-19/22-135. RA.RU.311806-2020) ИС и КС устанавливались на одном постаменте в камерах № 1 или № 4 штольни «Обнинск». Скважинные сейсмоприёмники, не имеющие трёхточечной опоры, устанавливались на слой крупного песка. Для соблюдения температурного режима в камере и исключения электрических помех вся регистрирующая и обрабатывающая аппаратура размещалась в надскважинном павильоне. Подключение аппаратуры к ИС и КС осуществлялось кабелями длиной 100 м из комплектов сейсмоприёмников. Кабели пропускались через гермоввод камеры. Затем обе двери камерного шлюза закрывались.

Выходы ИС и КС подключались к цифровому регистратору REFTEK-130 (СКЗ собственного шума каналов регистратора, определённые по формуле (28) в полуоктавных диапазонах частот, составили порядка 0.01 нм/с). Питание осуществлялось от источника постоянного тока GPS-3303. Продолжительность выстаивания (выдержки) сейсмоприёмников на постаментах до начала измерений составляла от нескольких суток до полутора месяцев. Оцифрованные в регистраторе с частотой дискретизации Fd сигналы с выходов ИС и КС заносились в ЭВМ для спектрально-корреляционной обработки и вычисления оценок СКЗ собственного шума ИС. Примеры синхронной записи сигналов двух СТШ и двух СКВ в полосе частот 0.5-16.0 Ги показаны на рис. 3.

Регистрация сейсмического фона велась непрерывно в течение нескольких суток. На время измерений питание сейсмоприёмников осуществлялось от аккумуляторов. Для снижения влияния сейсмического фона обработка и расчёт СКЗ собственного шума выполнялись, в основном, по трёх-четырёхчасовым записям в ночное время суток. В общей сложности выполнены десятки сеансов измерений для каждого типа сейсмоприёмников.

#### Результаты измерений собственного шума сейсмоприёмников

В табл. 2 и на рис. 4 приведены экспериментальные оценки СКЗ собственного шума вертикальных каналов СТШ в полуоктавных диапазонах частот согласно [ГОСТ, 1980], а также минимальные и средние оценки СКЗ вертикальной составляющей фона в штольне «Обнинск» во время выполнения измерений в нанометрах в секунду. Для сравнения приведены оценки СКЗ минимального сейсмического фона по скорости, вычисленные на основе модели LNM Геологической службы США для 1-го перцентиля (СКЗ фона для 1% от числа 20-минутных фрагментов сейсмических записей в узких частотных диапазонах за один год, по меньшей мере, для одной сейсмической станции не превышает LNM) [Berger et al., 2002]. Для 5-го перцентиля значения LNM увеличиваются приблизительно на 25% (2 ∂Б).

Коэффициенты корреляции одноименных каналов ИС и КС составляли до 0.999996, что косвенно подтверждало идентичность их передаточных характеристик. Таким образом, обеспечивалось измерение характеристик собственного шума при отношении СКЗ сейсмического фона к СКЗ собственного шума с относительной неопределённостью не более 20% при отношении  $\sigma_s/\sigma_c$  не более 30 *дБ* и не более 40% при отношении  $\sigma_s/\sigma_c$  40 *дБ*. Наилучшие результаты измерения собственного шума сейсмоприёмников, приближающиеся к теоретическим оценкам, получены после выстаивания на постаменте штольни во включённом состоянии в течение не менее одного месяца.

#### Выводы

Сейсмологические и технические условия на экспериментальной базе «Обнинск» ФИЦ ЕГС РАН позволили отработать методики и стендовую аппаратуру для измерения характеристик нелинейности и собственного шума высокочувствительных широкополосных и короткопериодных сейсмоприёмников. Разработанные методики

Окно: >< 30 с														< 60	c 🗘 >	22/08/202	2 06:59:01	▼ Пере	еход	Архив
22/08/2022	08:11:00	. 11	;03	. 11	;06	. 11	;09	. 11	12	. 11	1;15	. 11	18	11	;21	11	24	. 11	1;27	08:11:30
<b>DAS01.1</b> Макс: 10456 Смещ: 7 Мин : -11227	1	ww	AVIA	MA	www	An	ww	ww	NVV	MW	MM	~~~	ww	Mm	www	h	$\sim$	m	ww	ww
<b>DAS01.2</b> Макс: 9706 Смещ: -4 Мин : -9476	M	ww	m	M	www	Anth	ww	ww	AN	MW	MM	MM	ww	Ww	Anna	Mm	ww	m	ww	ww
<b>DAS01.3</b> Макс: 24182 Смещ: 11 Мин : -23329	44~	~~~~	~~~~	m	~~~	~~~	~~~	~~~~	mV	WW	M	~~~~	ww	www	~~~^	h	w			~~~~
<b>DAS01.4</b> Макс: 10587 Смещ: -14 Мин : -7524	m	MM	mn	hr	M	ww	ww	MM	hm	M	WW	many	nM	m	MM	hum	who	WW	have	M
<b>DAS02.1</b> Макс: 10426 Смещ: 7 Мин: -11067	M	ww	MA	M	m	Ann	www	ww	NV	W	MM	ww	ww	Mm	m	h	m	m	ww	www
<b>DAS02.2</b> Макс: 9842 Смещ: -3 Мин: -9613	M	ww	m	M	www	Anh	ww	MM	MW	m	MM	ww	ww	Ww	ann	Mm	ww	m	ww	www
<b>DAS02.3</b> Макс: 24092 Смещ: 7 Мин: -23121	~~~	www	~~~~	n	~~~	~~~~	~~~	~~~	w	M	M	~~~~	ww	www	m	www	~~~		~~~	m
<b>DAS02.4</b> Макс: 10652 Смещ: -14 Мин: -7748	mm	MM	MrA	Nr	ww	ww	ww	MM	hm	M	W	Warmy	nM	M	MA	Jum	ww	WW	mm	~~~~
22/08/2022	08:11:00	11	:03	11	:06	11	:09	11	12	11	:15	11	18	11	21	11	24	. 11	1:27	08:11:30

**Рис. 3**. Примеры синхронной регистрации сейсмического фона испытуемыми и контрольными сейсмоприёмниками в полосе частот 0.5–16.0 *Гц* 

Каналы: DAS01.1 – ИС короткопериодный вертикальный; DAS01.2 – ИС широкополосный канал Z; DAS01.3 – ИС широкополосный канал N; DAS01.4 – ИС широкополосный канал E; DAS02.1 – КС короткопериодный вертикальный; DAS02.2 – КС широкополосный канал Z; DAS02.3 – КС широкополосный канал N; DAS02.4 – КС широкополосный канал E

Диапазон частот, <i>Гц</i>	СКЗ минимального фона в штольне, <i>нм/с</i>	СКЗ фона по модели LNM, <i>нм/с</i>	Коэффициент корреляции	СКЗ собственного шума, <i>нм/с</i>
0.03-0.042	1.0	0.26	0.961	0.2
0.042-0.06	1.6	0.78	0.966	0.3
0.06-0.085	2.3	1.4	0.992	0.2
0.085-0.12	4.7	1.6	0.9996	0.09
0.12-0.17	16	8.3	0.99994	0.12
0.17-0.25	40	18	0.99997	0.21
0.25-0.35	39	13	0.99998	0.17
0.35-0.5	22	5.4	0.99996	0.14
0.5-0.7	8.4	2.2	0.99991	0.08
0.7-1.0	3.9	0.92	0.9987	0.14
1.0-1.4	4.9	0.43	0.9995	0.11
1.4-2.0	9.2	0.28	0.9998	0.13
2.0-2.8	17	0.27	0.999965	0.1
2.8-4.0	13	0.35	0.999985	0.05
4.0-5.6	5.8	0.37	0.99985	0.07
5.6-8.0	3.2	0.29	0.99965	0.06
8.0-11.2	4.1	0.24	0.99940	0.10
11.2-16.0	3.5	0.27	0.9981	0.15

**Таблица 2.** Результаты измерений СКЗ собственного шума вертикальных каналов широкополосных сейсмоприёмников в полуоктавных диапазонах частот



**Рис. 4**. Экспериментальные оценки СКЗ собственного шума вертикальных каналов сейсмоприёмников и фона в штольне «Обнинск» в полуоктавных диапазонах, *нм/с* 

В табл. 3 и на рис. 5 приведены экспериментальные оценки СКЗ собственного шума СКВ в полуоктавных диапазонах частот.

Диапазон частот, <i>Гц</i>	СКЗ фона в штольне, <i>нм/с</i>	Коэффициент корреляции	СКЗ собственного шума, <i>нм/с</i>	СКЗ фона по модели LNM, <i>нм/с</i>
0.5-0.7	9.9	0.9987	0.3	2.2
0.7-1.0	7.5	0.997	0.2	0.92
1.0-1.4	6.9	0.998	0.2	0.43
1.4-2.0	11.6	0.9995	0.2	0.28
2.0 - 2.8	20.5	0.999965	0.1	0.27
2.8-4.0	11.7	0.99994	0.1	0.35
4.0-5.6	7.0	0.9997	0.1	0.37
5.6-8.0	3.8	0.9995	0.07	0.29
8.0-11.2	5.2	0.9997	0.07	0.24
11.2-16.0	5.1	0.9996	0.07	0.27

Таблица 3.	Результаты измерений	СКЗ собственного	шума короткопе	риодных вертика	альных
	сейсмоприёмн	иков в полуоктавн	ых диапазонах ча	стот	



**Рис.** 5. Экспериментальные оценки СКЗ собственного шума вертикальных короткопериодных сейсмоприёмников и фона в штольне «Обнинск» в полуоктавных диапазонах, *нм/с* 

Экспериментальные оценки СКЗ собственного шума горизонтальных каналов СТШ в полуоктавных диапазонах частот приведены в табл. 4 и на рис. 6.

Диапазон частот, <i>Гц</i>	СКЗ фона в штольне, <i>нм/с</i>	Коэффициент корреляции	СКЗ собственного шума СТШ, нм/с	СКЗ фона по модели LNM, <i>нм/с</i>
0.03-0.042	0.9	0.90	0.3	0.26
0.042-0.06	0.9	0.90	0.3	0.78
0.06-0.085	2.0	0.978	0.3	1.4
0.085-0.12	3.0	0.9989	0.1	1.6
0.12-0.17	16	0.99996	0.1	8.3
0.17-0.25	40	0.99998	0.2	18
0.25-0.35	49	0.999996	0.1	13
0.35-0.5	24.6	0.999983	0.1	5.4
0.5-0.7	14.6	0.999988	0.05	2.2
0.7-1.0	10.6	0.999978	0.05	0.92
1.0-1.4	14.3	0.999976	0.07	0.43
1.4-2.0	16	0.999975	0.08	0.28
2.0 - 2.8	12	0.999966	0.07	0.27
2.8-4.0	5.9	0.999954	0.04	0.35
4.0-5.6	8.4	0.999977	0.04	0.37
5.6-8.0	4.6	0.99992	0.04	0.29
8.0-11.2	3.7	0.99988	0.04	0.24
11.2-16.0	2.7	0.9995	0.06	0.27

**Таблица 4.** Результаты измерений СКЗ собственного шума горизонтальных каналов сейсмоприёмников в полуоктавных диапазонах частот



**Рис. 6**. Экспериментальные оценки СКЗ собственного шума горизонтальных каналов сейсмоприёмников и фона в штольне «Обнинск» в полуоктавных диапазонах, *нм/с* 

измерений характеристик собственного шума и нелинейных искажений могут использоваться для проверок характеристик нелинейности и собственного шума высокочувствительных сейсмоприёмников. Из приведённых в табл. 2 и 3 СКЗ сейсмического фона в штольне и СКЗ минимального сейсмического фона по модели LNM следует, что условия экспериментальной базы «Обнинск» ФИЦ ЕГС РАН обеспечивают возможность

выполнения измерений СКЗ собственных шумов сейсмоприёмников с относительной неопределённостью не более 20% в диапазонах частот ниже 2 Ги и выше 5.6 Ги. В диапазоне частот от 2 до 5.6 Ги обеспечивается возможность выполнения измерений СКЗ собственных шумов с относительной неопределённостью не более 40%. Это вполне достаточно для проведения допускового контроля сейсмоприёмников на соответствие техническим требованиям при их изготовлении.

Благодаря стабильной температуре в штольне «Обнинск» удалось получить достаточно точные оценки характеристик высокочувствительных сейсмоприёмников. В зависимости от текущего уровня сейсмического фона неопределённость результатов измерений среднеквадратических значений собственного шума сейсмоприёмников в полуоктавных диапазонах частот составила 20–30%, неопределённость измерения коэффициента нелинейных искажений составила 0.0004%.

Условия экспериментальной базы «Обнинск» ФИЦ ЕГС РАН обеспечивают возможность выполнения измерений собственных шумов и нелинейных искажений в измерительных сейсмических каналах с удовлетворительной точностью. Экспериментальная база «Обнинск» является одним из перспективных мест для проведения исследований и технического контроля современных сейсмических приборов.

#### Литература

*Аки К., Ричардс П.* Количественная сейсмология: Теория и методы. В 2-х т. Пер. с англ. Т. 1. – М.: Мир, 1983. – 519 с.

Володин А.А., Зеликман Э.И., Капустян Н.К., Креков М.М., Фремд В.М. Опыт исследования нелинейных искажений сейсмометров // Разработка и исследования сейсмометрической аппаратуры (Сейсмические приборы. Вып. 17). – М.: Наука, 1985. – С. 134–138.

*ГОСТ 12090-80.* Частоты для акустических измерений. Предпочтительные ряды. – Введ. 1981-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 3 с. – URL: https://gostrf.com/normadata/1/4294838/4294838836. pdf (дата обращения: 22.02.2024 г.).

*ГОСТ Р 54500.1-2011*. Неопределённость измерения. Часть 1. Введение в руководства по неопределённости измерения. — Введ. 2011-11-16. — М.: Стандартинформ, 2012. — 23 с. — URL: https://ohranatruda.ru/upload/iblock/200/4293793732.pdf (дата обращения: 22.02.2024 г.).

*Жовинский В.Н., Араховский В.Ф.* Корреляционные устройства. – М.: Энергия, 1974. – 248 с.

Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин. – Л.: Наука, 1974. – 108 с.

Кишкина С.Б., Бугаев Е.Г., Лободенко И.Ю. Разработка и реализация системы сейсмологического мониторинга на основе руководства по безопасности при использовании атомной энергии «Сейсмологический мониторинг участков размещения ядерно- и радиационно опасных объектов (РБ-142-18)» // Ядерная и радиационная безопасность. – 2021. – № 1 (99). – С. 28–42. – DOI: 10.26277/ SECNRS.2021.99.1.003. – EDN: GVFWMG

Попов И.И., Старовойт О.Е. Центральная сейсмическая обсерватория «Обнинск» в системе сейсмических наблюдений СССР // Юбилейная конференция НИИ г. Обнинска. – М.: Атомиздат, 1971. – С. 35–38.

*Рубичев Н.А.* Оценка и измерение искажений радиосигналов. – М.: Советское радио, 1978. – 168 с.

*Старовойт О.Е.* Сейсмологический центр в Обнинске в 1963–2003 гг. / Отв. ред. А.Я. Сидорин. – М.: ИФЗ РАН, 2017. – 100 с.

Старовойт Ю.О., Барриентос С.П. Технические требования к обнаружению сигналов на сейсмических станциях международной системы мониторинга // Вестник НЯЦ РК. – 2005. – Вып. 2 (22). – С. 15–20.

Уткин П.М., Кожевников А.Ю. Способ прецизионных измерений амплитуды гармонических колебаний сверхнизких и звуковых частот при сильной зашумлённости сигнала / Патент RU 2714861 С1. – Роспатент, 2019. – EDN: DHQZKK

Уткин П.М., Кожевников А.Ю. Способ измерения коэффициента интермодуляции сильно зашумлённого сигнала / Патент RU 2781225 С1. – Роспатент, 2021а. – EDN: VCLIVJ

Уткин П.М., Кожевников А.Ю. Способ прецизионных измерений относительных значений амплитудно-частотной характеристики приёмников сигнала / Патент RU 2781464 С1. – Роспатент, 2021b. – EDN: LETJPJ

Эльтеков А.Ю., Столяров О.А. Базина З.П., Бреднев С.П., Слепцов В.И. Об опыте исследований характеристик сейсмических приборов на экспериментальной базе «Боровое» // Вестник НЯЦ РК. – 2004. – Вып. 2 (18). – С. 65–69.

Bashilov I.P., Gerasimchuk O.A., Sleptsov V.I., Eltekov A.Y. A short-period vertical seismometer and auxiliary equipment for installation in boreholes // Seismic Instruments. – 2022. – V. 58, N 5. – P. 521– 533. – DOI: 10.3103/s0747923922050048. – EDN: KWGRGO

Berger J., Bolton H., Davis P., Ekstrom G., Hutt C. The GSN noise model: Estimates of the least ambient earth noise from the IRIS Global Seismographic Network. – USGS, Harvard University, 2002. – URL: http://seismology.harvard.edu (дата обращения: 22.02.2024 г.).

Dai K., Li X., Lu C., You Q., Huang Z., Wu H.F. A lowcost energy-efficient cable less geophone unit for passive surface wave surveys // Sensors. – 2015. – V. 15, N 10. – P. 24698–24715. – DOI: 10/3390/s151024698 Short-period Borehole Seismometer. Model GS-13BH, GS-21 and 20171 // Geotech Instruments, LLC. [Site]. – URL: https://www.geoinstr.com/sensors.htm (дата обращения 20.01.2024).

*Thomas A.M., Bodmer M., Roering J.J., Spica Z., Schulz W.H.* Using a dense seismic array to determine structure and site effects the two towers earthflow in Northern California // Seismological Research Letters. – 2020. – V. 91, N 2A. – P. 913–920. – DOI: 10.1785/0220190206

#### Сведения об авторах

Эльтеков Александр Юрьевич, вед. специалист Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА»), г. Москва, Россия. E-mail: sasha.eltekov@yandex.ru

**Герасимчук Олег Анатольевич,** канд. техн. наук, зам. гл. конструктора ФГУП «ВНИИА», г. Москва, Россия. E-mail: oleg.gerasimchuk@yandex.ru

Уткин Пётр Михайлович, вед. инженер-исследователь ФГУП «ВНИИА», г. Москва, Россия. E-mail: utkinpm@yandex.ru

Виноградов Юрий Анатольевич, д-р техн. наук, директор Федерального государственного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), г. Обнинск, Россия. E-mail: yvin@gsras.ru

# Researches and measurements of high-sensitive seismometers at experimental base «Obninsk»

© 2024 A.Yu. Eltekov<sup>1</sup>, O.A. Gerasimchuk<sup>1</sup>, P.M. Utkin<sup>1</sup>, Yu.A. Vinogradov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>VNIIA, Moscow, Russia; <sup>2</sup>GS RAS, Obninsk, Russia

Received February 22, 2024

Abstract One of the main directions of new seismometers development for seismological monitoring systems is decreasing the instrumental noise level and nonlinearity distortions of the instrumental seismic channels. In accordance with modern requirements for high-sensitive seismological stations, the instrumental noise of seismometers should be at least three times less than local seismic background noise. By theoretical estimations modern high-sensitive seismometers have high level features: instrumental noise is lower than the minimal seismic background noise, nonlinearity factor is about 0.01% and less. However, the problem of experimental estimation of these parameters in conditions of ambient seismic backgrounds remains to be under consideration. This problem is especially important during development and production of new seismometers. The article presents some results of studying and measuring the instrumental noise level and nonlinearity factor in channels of broadband and short-period seismometers carried out at the experimental base "Obninsk". To provide a high precision of measurements, the narrow-band digital filtration and spectrum-correlation data procession technique decreasing influence of the seismic background motion on the results uncertainty were used. Due to stable temperature and insulation in the gallery of 30-meter depth, a 20-30% uncertainty for instrumental noise characteristic measuring, which is 10-30 times lower than local seismic background noise, and 0.0004% uncertainty of nonlinearity factor measuring were achieved. The seismological and environmental conditions at the experimental base "Obninsk" of the Geophysical Survey of RAS provide necessary abilities for researche and measurement of instrumental noise characteristics and non-linear distortion factor of high-sensitive seismometers with satisfactory accuracy.

Keywords: Seismometer, instrumental noise, non-linear distortion, seismic background noise, uncertainty.

For citation Eltekov, A.Yu., Gerasimchuk, O.A., Utkin, P.M., & Vinogradov, Yu.A. (2024). [Researches and measurements of high-sensitive seismometers at experimental base «Obninsk»]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], *6*(2), 52-69. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.2.04. EDN: RMYBBU

#### References

Aki, K., & Richards, P.G. (1980). *Quatitative Seismology. Theory and Methods. Vol. 1.* USA, San Francisco: W.H. Freeman and Company Publ., 557 p. DOI: *10.1017/s0016756800034439* 

Bashilov, I.P., Gerasimchuk, O.A., Sleptsov, V.I., & Eltekov, A.Yu. (2022). A short-period vertical seismometer and auxiliary equipment for installation in boreholes. *Seismic Instruments*, 58(5), 521-533. DOI: 10.3103/s0747923922050048. EDN: KWGRGO

Berger, J., Bolton, H., Davis, P., Ekstrom, G., & Hutt, C. (2002). *The GSN noise model: Estimates of the least ambient earth noise from the IRIS Global Seismographic Network*. USGS: Harvard University Publ. Retrieved from *http://seismology.harvard.edu* 

Dai, K., Li, X., Lu, C., You, Q., Huang, Z., & Wu, H.F. (2015). A low-cost energy-efficient cable less geophone unit for passive surface wave surveys. *Sensors*, *15*(10), 24698-24715. DOI: *10/3390/s151024698* 

Eltekov, A.Yu., Stolyarov, O.A., Bazina, Z.P., Brednev, S.P., & Slertsov, V.I. (2004). [On research of seismic equipment characteristics at Borovoye Experimental base]. *Vestnik NIaTs RK* [NNC RK Bulletin], *2*(18), 65-69. (In Russ.).

Geotech Instruments, LLC. (2024). Short-period Borehole Seismometer. Models GS-13BH, GS-21 and 20171. Retrieved from https://www.geoinstr.com/sensors. htm

GOST 12090-80. (1980). [State Standard 12090-80. Frequencies for acoustic measurements. Prefered rows]. Moscow, USSR: Edition of Standards Publ., 3 p. (In Russ.). Available at: *https://gostrf.com/ normadata/1/4294838/4294838836.pdf* 

GOST R 54500.1-2011. (2011). [State Standard R 54500.1-2011. Uncertainty of measurement. Part 1. Introduction to guides on uncertainty in measurement]. Moscow, Russia: Standartinform Publ., 23 p. (In Russ.). Available at: *https://ohranatruda.ru/upload/iblock/200/4293793732.pdf* 

Kishkina, S.B., Bugaev, E.G., & Lobodenko, I.Yu. (2021). [Development and realization of seismological monitoring system based on safety rules at atomic power exploration "Seismological monitoring of sites for nuclear and radiation dangerous facilities (RB-142-18)"]. *Iadernaia i radiatsionnaia bezopasnost*' [Nuclear and Radiation Safety], *1*(99), 28-42. (In Russ.). DOI: *10.26277/SECNRS.2021.99.1.003.* EDN: GVFWMG

Popov, I.I., & Starovoit, O.E. (1971). [Central seismological observatory "Obninsk" in the system of seismological monitoring of the USSR]. In *Iubileinaia konferentsiia NII g. Obninska* [Celebration conference of Obninsk research institutes] (pp. 35-38). Moscow, USSR: "Atomizdat" Publ. (In Russ.).

Rubichev, N.A. (1978). *Otsenka i izmerenie iskazhenii radiosignalov* [Estimation and measurements of radio signal distortions]. Moscow, USSR: "Sovetskoye Radio" Publ., 168 p. (In Russ.).

Starovoit, O.E. (2017). Seismologicheskii tsentr v Obninske v 1963–2003 gg. Otv. red. A.Ia. Sidorin [Seismological center at Obninsk in 1963-2003. Ed. A.Yu. Sidorin]. Moscow, Russia: IPE RAS, 100 p. (In Russ.).

Starovoit, Yu.O., & Barrientos, S.P. (2005). [Technical requirements to signal detection at seismic stations of the International monitoring system]. *Vestnik NIaTs RK* [NNC RK Bulletin], *2*(22), 15-20. (In Russ.).

Thomas, A.M., Bodmer, M., Roering, J.J., Spica, Z., & Schulz, W.H. (2020). Using a dense seismic array to determine structure and site effects the two towers earth-

flow in Northern California. Seismological Research Letters, 91(2A), 913-920. DOI: 10.1785/0220190206

Utkin, P.M., & Kozhevnikov, A.Yu. (2019). [Method for precise measurement of harmonic oscillations amplitude of ultralow and audible frequencies with strong signal noise]. Rospatent. Patent No. 2714861. (In Russ.). EDN: DHQZKK

Utkin, P.M., & Kozhevnikov, A.Yu. (2021a). [Method for measuring the intermodulation coefficient of a highly noisy signal]. Rospatent. Patent No. 2781225. (In Russ.). EDN: VCLIVJ

Utkin, P.M., & Kozhevnikov, A.Yu. (2021b). [Method for precision measurements of relative values of the amplitude-frequency response of signal receivers]. Rospatent. Patent No. 2781464. (In Russ.). EDN: LETJPJ

Volodin, A.A., Zelikman, E.I., Kapustyan, N.K., Krekov, M.M., & Fremd, V.M. (1985). [Experience of research of non-linear distortion of seismometers]. In *Razrabotka i issledovaniia seismometricheskoi apparatury* (*Seismicheskie pribory. Vyp. 17*) [Development and researches of seismic measurement instruments. Seismic Instruments, V. 17] (pp. 134-138). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).

Zaidel, A.N. (1974). *Oshibki izmerenii fizicheskikh velichin* [Errors of physical value measurements]. Leningrad, USSR: Nauka Publ., 108 p. (In Russ.).

Zhovinsky, V.N., & Arakhovsky, V.F. (1974). *Korreliatsionnye ustroistva* [Correlation devices]. Moscow, USSR: Energiya Publ., 248 p. (In Russ.).

#### Information about authors

**Eltekov Alexander Yurievich,** Leading Specialist of the Federal State Unitary Enterprise Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, Russia. E-mail: sasha.eltekov@yandex.ru

Gerasimchuk Oleg Anatolievich, PhD, Deputy Chief Designer of the VNIIA, Moscow, Russia. E-mail: oleg.gerasimchuk@yandex.ru

**Utkin Petr Michailovich,** Leading Engineer-Researcher of the VNIIA, Moscow, Russia. E-mail: utkinpm@yandex.ru **Vinogradov Yuri Anatolyevich,** Dr., Director of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS), Obninsk, Russia. E-mail: yvin@gsras.ru