

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ И МОНИТОРИНГА ЗАРОЖДЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Для мінімізації збитків від землетрусів пропонується інтелектуальна робастна noise технологія і система, що дозволяє поєднувати моніторинг прихованого періоду порушення сейсмостійкості з моніторингом зародження аномальних сейсмічних процесів (АСП). Експериментальні дослідження показали, що систему можна використовувати в якості інструментарію, як для виявлення зони очікуваного землетрусу, так і для безперервного контролю мікрозмін сейсмостійкості

Ключові слова: сейсмоакустична станція, сейсмостійкість, ідентифікація, матриця, моніторинг, шум, робастні оцінки

Для минимизации ущерба от землетрясений предлагается интеллектуальная робастная noise технология и система, позволяющая совмещать мониторинг скрытого периода нарушения сейсмостойкости с мониторингом зарождения аномальных сейсмических процессов (АСП). Экспериментальные исследования показали, что систему можно использовать в качестве инструментария, как для выявления зоны ожидаемого землетрясения, так и для контроля нарушений сейсмостойкости

Ключевые слова: сейсмоакустическая станция, сейсмостойкость, идентификация, матрица, мониторинг, шум, робастные оценки

Т. А. Алиев

Доктор технических наук, академик

Директор института**

E-mail: telmancyber@rambler.ru

А. М. Аббасов

Доктор технических наук, академик

Министерство связи и высоких технологий Азербайджанской Республики

ул. Зарифы Алиевой, 77, г. Баку,

Азербайджанская Республика, AZ1000

E-mail: mincom@mincom.gov.az

Г. А. Гулуев

Доктор технических наук*

E-mail: scb_06@mail.ru

Ф. Г. Пашаев

Доктор технических наук*

E-mail: pasha.farhad@gmail.com

У. Э. Саттарова

Доктор философии по техническим наукам

Лаборатория идентификации стохастических процессов**

E-mail: ulker.rzaeva@gmail.com

*Специальное конструкторское

бюро Института Систем Управления**

**Институт Систем Управления

Национальной Академии Наук Азербайджана

ул. Б. Вахабзаде, 9, г. Баку, Азербайджанская Республика, AZ1141

1. Введение

За последние годы по проблеме прогнозирования землетрясений и оценке технического состояния строительных объектов ведутся многочисленные научно-исследовательские работы [1–4]. Известно, что в настоящее время по вине широко применяемых сейсмических систем землетрясения с катастрофическими последствиями своевременно не прогнозируются. Кроме того, также отсутствуют недорогие и достаточно надежные системы контроля сейсмостойкости строительных объектов (ССО). Неудовлетворительное состояние совокупности этих двух факторов при землетрясении приводит к многочисленным авариям с катастрофическими последствиями [5–9].

Также известно, что в странах, расположенных в сейсмоактивных зонах, в результате зарождения АСП часто происходят маломощные землетрясения. Для обеспечения безопасности населения после каждого такого землетрясения целесообразно использовать их для выявления начала скрытого периода изменения сейсмостойкости жилых помещений и стратегических объектов.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В реальной жизни в сейсмических регионах при эксплуатации некоторых строительных объектов по-

сле определенного промежутка времени T_0 нормального функционирования в силу различных причин наступает период T_1 их скрытого перехода в аварийное состояние. Довольно часто это происходит в результате маломощных землетрясений, что приводит к изменению их сейсмостойкости. В результате последующих маломощных землетрясений, ураганных ветров с ливневыми дождями они переходят во временной интервал явно выраженного аварийного состояния T_2 .

Несмотря на различия длительности времени T_0 , T_1 , T_2 , задача мониторинга в рассматриваемых случаях сводится к обеспечению надежной индикации начала времени T_1 периода скрытого изменения сейсмостойкости объекта или скрытого периода зарождения АСП [10–13].

В связи с этим рассмотрим этот вопрос более подробно.

Допустим, что при нормальном состоянии объекта в период времени T_0 для зашумленных центрированных сигналов $g(i\Delta t) = X(i\Delta t) + \epsilon(i\Delta t)$, получаемых на выходах соответствующих датчиков, выполняются известные классические условия, т. е. справедливы равенства [2,3]:

$$\omega_{T_0} [g(i\Delta t)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_g}} e^{-\frac{(g(i\Delta t))^2}{2D_g}}, \quad D_\epsilon \approx 0, \quad D_g \approx D_X;$$

$$R_{gg}(\mu) \approx R_{XX}(\mu); \quad m_g \approx m_X \approx m_\epsilon \approx 0;$$

$$R_{X\epsilon}(\mu = 0) \approx 0, \quad r_{X\epsilon} \approx 0, \quad (1)$$

где $\omega_{T_0} [g(i\Delta t)]$ – закон распределения сигнала $g(i\Delta t)$; D_ϵ , D_X , D_g – оценки дисперсий помехи, полезного $X(i\Delta t)$ и суммарного $g(i\Delta t)$ сигналов соответственно; $R_{XX}(\mu)$, $R_{gg}(\mu)$ – оценки корреляционных функций полезного сигнала $X(i\Delta t)$ и суммарного сигнала $g(i\Delta t)$; m_ϵ , m_X , m_g – математические ожидания помехи $\epsilon(i\Delta t)$, полезного и суммарного сигналов; $R_{X\epsilon}(\mu = 0)$, $r_{X\epsilon}$ – взаимнокорреляционная функция и коэффициент корреляции между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\epsilon(i\Delta t)$.

Однако когда наступает скрытый период зарождения АСП или период незаметного изменения сейсмостойкости объекта выполнение условия (1) нарушается [1–3, 11–13], т. е.:

$$\omega_{T_1} [g(i\Delta t)] \neq \omega_{T_0} [g(i\Delta t)], \quad D_\epsilon \neq 0, \quad D_g \neq D_X,$$

$$R_{gg}(\mu) \neq R_{XX}(\mu), \quad m_g \neq m_X, \quad R_{X\epsilon}(\mu = 0) \neq 0, \quad r_{X\epsilon} \neq 0. \quad (2)$$

При этом период нормального состояния T_0 заканчивается и начинается период T_1 . В результате из-за нарушения равенства (1) статистические оценки сигнала $g(i\Delta t)$ определяются с некоторой погрешностью. По этой причине в течение периода времени T_1 в системах контроля затрудняется своевременное обнаружение начальной стадии вышеуказанных процессов [13]. Затем завершается период T_1 и наступает период времени T_2 , когда процессы начинают приобретать явно выраженную форму. В известных системах мониторинга, в основном, в период времени T_2 регистрируется нарушение сейсмостойкости объектов. То же самое происходит при достижении АСП критического состояния, когда происходит землетрясение, так

как только этот момент регистрируется стандартными сейсмическими станциями.

По указанным причинам результаты мониторинга как ССО, так и начала АСП оказываются запоздалыми. Для регистрации этих процессов в период времени T_1 необходимо создание технологии и системы, позволяющей уловить момент нарушения равенств (1).

Следовательно, для городов, расположенных в сейсмоактивных регионах, для минимизации ущерба разрушительных землетрясений необходимо создания общегородской системы как непрерывного мониторинга скрытого периода изменения сейсмостойкости жилых фондов и стратегических объектов, так и сигнализации о начале АСП. При этом целесообразно создание информационной технологии и системы, позволяющей их совмещать.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является создание системы минимизации ущерба от сильных землетрясений путем взаимосвязанного решения проблемы контроля микроизменения ССО во время частых маломощных землетрясений и мониторинга скрытого периода зарождения АСП.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- разработать систему, позволяющую осуществлять мониторинг скрытого периода зарождения АСП;
- разработать распределенную систему мониторинга нарушений ССО во время маломощных землетрясений, позволяющую совмещать ее с мониторингом зарождения АСП;
- использовать сейсмоакустические станции мониторинга АСП для мониторинга скрытого периода процесса формирования вулканов значительно раньше их извержения.

4. Помехотехнологии мониторинга начала времени T_1

Проведенные исследования показали, что как в скрытом периоде T_1 зарождения АСП, так и в начале времени T_1 нарушения ССО, в первую очередь меняются дисперсия помехи D_ϵ , оценки величины помехокоэффициента $R_{X\epsilon}(\mu = 0)$, взаимно корреляционной функции $R_{X\epsilon}(\mu = 0)$, и коэффициента корреляции $r_{X\epsilon}$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\epsilon(i\Delta t)$ [7].

В связи с этим рассмотрим один из возможных вариантов приближенного вычисления этих оценок. Для этого известное выражение

$$D_g = R_{gg}(\mu = 0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g(i\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g^2(i\Delta t), \quad (3)$$

представим в виде:

$$R_{gg}(\mu = 0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \epsilon(i\Delta t)]^2. \quad (4)$$

Понятно, что, раскрывая скобку, получим

$$R_{gg}(\mu=0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^2(i\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[X(i\Delta t) \cdot \epsilon(i\Delta t)] + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \epsilon^2(i\Delta t). \quad (5)$$

Принимая обозначения

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^2(i\Delta t) = R_{XX}(\mu=0), \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[X(i\Delta t)\epsilon(i\Delta t)] &= 2R_{X\epsilon}(\mu=0) \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \epsilon^2(i\Delta t) &= R_{\epsilon\epsilon}(\mu=0) = D_\epsilon \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Получим

$$R_{gg}(\mu=0) \approx R_{XX}(\mu=0) + 2R_{X\epsilon}(\mu=0) + R_{\epsilon\epsilon}(\mu=0), \quad (8)$$

где величину $R_{X\epsilon}(\mu=0)$

$$2R_{X\epsilon}(\mu=0) + R_{\epsilon\epsilon}(\mu=0) = R_{X\epsilon\epsilon}(\mu=0), \quad (9)$$

назовем величиной помехокорреляции.

При этом приближенную оценку $R_{X\epsilon}(\mu=0)$ взаимнокорреляционной функции между полезным сигналом и помехой можно определить по выражению:

$$2R_{X\epsilon}(\mu=0) \approx R_{gg}(\mu=0) - R_{XX}(\mu=0) - R_{\epsilon\epsilon}(\mu=0). \quad (10)$$

Известно [7, 8, 14–17], что при выполнении равенства (1) и при соответствующем выборе шага дискретизации Δt можно считать справедливыми приближенные равенства:

$$R_{gg}(\mu=1) \approx R_{XX}(\mu=1), \quad (11)$$

$$R_{gg}(\mu=2) \approx R_{XX}(\mu=2), \quad (12)$$

$$R_{gg}(\mu=3) \approx R_{XX}(\mu=3), \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{XX}(\mu=0) &= R_{XX}(\mu=1) + \Delta R_{XX}(\mu=1), \\ R_{XX}(\mu=0) &\approx R_{XX}(\mu=1) + \Delta R_{XX}(\mu=2). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

При этом с учетом выражений (10)–(14) можно написать

$$R_{XX}(\mu=0) \approx R_{XX}(\mu=1) + \Delta R_{XX}(\mu=1) \approx R_{gg}(\mu=1) + [R_{gg}(\mu=2) - R_{gg}(\mu=3)]. \quad (15)$$

Следовательно, выражение (8) можно представить в виде:

$$R_{gg}(\mu=0) = R_{gg}(\mu=1) + [R_{gg}(\mu=2) - R_{gg}(\mu=3)] + 2R_{X\epsilon}(\mu=0) + R_{\epsilon\epsilon}(\mu=0), \quad (16)$$

откуда выражение (10) можно привести к виду:

$$2R_{X\epsilon}(\mu=0) = [R_{gg}(\mu=0) - [R_{gg}(\mu=1) + (R_{gg}(\mu=2) - R_{gg}(\mu=3))] - R_{\epsilon\epsilon}(\mu=0)],$$

$$\begin{aligned} R_{X\epsilon}(\mu=0) &\approx \frac{1}{2} [R_{gg}(\mu=0) - \\ &- [R_{gg}(\mu=1) + (R_{gg}(\mu=2) - R_{gg}(\mu=3))] - R_{\epsilon\epsilon}(\mu=0)] \approx \\ &\approx \frac{1}{2} \sum [g(i\Delta t)g(i\Delta t) - \\ &- [g(i\Delta t)g(i+1)\Delta t + g(i\Delta t)g(i+2)\Delta t - g(i\Delta t)g(i+3)\Delta t - D_{\epsilon\epsilon}]]. \end{aligned} \quad (17)$$

При этом выражение (9) можно представить в виде

$$\begin{aligned} R_{X\epsilon\epsilon}(\mu=0) &\approx R_{gg}(\mu=0) - \\ &- [R_{gg}(\mu=1) + R_{gg}(\mu=2) - R_{gg}(\mu=3)] + \\ &+ R_{\epsilon\epsilon}(\mu=0) - D_\epsilon = R_{gg}(\mu=0) - \\ &- [R_{gg}(\mu=1) + R_{gg}(\mu=2) - R_{gg}(\mu=3)], \end{aligned} \quad (18)$$

по которому легко можно вычислить оценку $R_{X\epsilon\epsilon}(0)$, т. е. величину помехокорреляции. Проведенные эксперименты показали, что в начале времени T_1 резко изменяются величины оценок $R_{X\epsilon}(0)$, $R_{X\epsilon\epsilon}(0)$, и они становятся носителями диагностической информации, как об изменении сейсмостойкости, так и о начале зарождения АСП.

Эти эксперименты также показали, что при мониторинге сейсмостойкости высотных домов оценку дисперсии помехи D_ϵ также можно использовать в качестве одного из надежных индикаторов. Это связано с тем, что в начале временного интервала T_1 оценки характеристик помехи $\epsilon(i\Delta t)$ как при наличии корреляции между $X(i\Delta t)$ и $\epsilon(i\Delta t)$, так и при ее отсутствии, резко меняются. При этом для случая, когда $R_{X\epsilon}(0) \approx 0$, оценку дисперсии помехи D_ϵ можно определить по формуле [2,3]:

$$D_\epsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g^2(i\Delta t) + g(i\Delta t)g(i+2)\Delta t - 2g(i\Delta t)g(i+1)\Delta t]. \quad (19)$$

Понятно, что, зная оценку D_ϵ , можно также определить оценку дисперсии полезного сигнала D_x по выражению:

$$D_x = D_g - D_\epsilon. \quad (20)$$

Определение оценки дисперсии помехи D_ϵ и взаимнокорреляционной функции $R_{X\epsilon}(\mu=0)$ по выражениям (17), (19) возможно только для случая, когда между $X(i\Delta t)$ и $\epsilon(i\Delta t)$ нет корреляции. Для их вычисления при наличии корреляции необходимо создание технологии определения оценки релейной взаимнокорреляционной функции $R_{X\epsilon}^*(\mu=0)$. Кроме того, для повышения надежности и достоверности результа-

тов мониторинга начала времени T_1 оценку релейной взаимно корреляционной функции $R_{X\epsilon}^*(\mu=0)$ также целесообразно применять в качестве носителя диагностической информации. В связи с вышеуказанным, рассмотрим этот вопрос более подробно. Для этого сначала примем следующие обозначения:

$$\operatorname{sgn} g(i\Delta t) = \operatorname{sgn} x(i\Delta t) = \begin{cases} 1 & \text{при } g(i\Delta t) > 0 \\ 0 & \text{при } g(i\Delta t) = 0 \\ -1 & \text{при } g(i\Delta t) < 0 \end{cases} \quad (21)$$

и

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} g(i\Delta t) \cdot \epsilon(i+\mu)\Delta t \neq 0 & \text{ при } \mu = 0, \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} g(i\Delta t) \cdot \epsilon(i+\mu)\Delta t = 0 & \text{ при } \mu \neq 0, \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \epsilon(i\Delta t) \cdot \epsilon(i\Delta t) \neq 0 & \text{ при } \mu = 0, \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \epsilon(i\Delta t) \cdot \epsilon(i+\mu) = 0 & \text{ при } \mu \neq 0. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

При этом формулу определения оценки релейной корреляционной функции $R_{gg}^*(\mu=0)$ при наличии корреляции между $X(i\Delta t)$ и $\epsilon(i\Delta t)$ можно представить в виде:

$$\begin{aligned} R_{gg}^*(\mu=0) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} g(i\Delta t) g(i\Delta t) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} g(i\Delta t) \cdot [X(i\Delta t) + \epsilon(i\Delta t)] = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} X(i\Delta t) X(i\Delta t) + \\ &+ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} X(i\Delta t) \epsilon(i\Delta t) = R_{XX}^*(\mu=0) + R_{X\epsilon}^*(\mu=0). \end{aligned} \quad (23)$$

Для случая, когда имеет место корреляция между $X(i\Delta t)$ и $\epsilon(i\Delta t)$, можно считать справедливыми следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} \Delta R_{gg}^*(\mu=0) - \Delta R_{gg}^*(\mu=1) &\neq \Delta R_{gg}^*(\mu=1) - \Delta R_{gg}^*(\mu=2), \\ \Delta R_{gg}^*(\mu=1) - \Delta R_{gg}^*(\mu=2) &\approx \Delta R_{gg}^*(\mu=2) - \Delta R_{gg}^*(\mu=3) \approx \Delta R_{gg}^*(\mu=3) - \Delta R_{gg}^*(\mu=4) \approx 0, \\ \Delta R_{XX}^*(\mu=1) - \Delta R_{XX}^*(\mu=2) &\approx \Delta R_{gg}^*(\mu=2) - \Delta R_{gg}^*(\mu=3) \approx \Delta R_{gg}^*(\mu=3) - \Delta R_{gg}^*(\mu=4) \approx 0. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

На основе выражений (21)–(24) можно показать, что оценку релейной взаимно корреляционной функции $R_{X\epsilon}^*(\mu=0)$ можно определить из формулы:

$$\Delta R_{gg}^*(\mu=0) \approx R_{XX}^*(\mu=0) + R_{X\epsilon}^*(\mu=0), \quad (25)$$

где

$$R_{X\epsilon}^*(0) \approx \Delta R_{gg}^*(\mu=0) - R_{XX}^*(\mu=0). \quad (26)$$

Следовательно, для вычисления $R_{X\epsilon}^*(\mu=0)$ по выражению (26) необходимо определить $R_{XX}^*(\mu=0)$. Из равенств (24) следует, что оценку $R_{XX}^*(\mu=0)$ можно вычислить по следующему выражению:

$$\begin{aligned} R_{XX}^*(\mu=0) &\approx R_{XX}^*(\mu=1) + \Delta R_{XX}^*(\mu=1) \approx \\ &\approx R_{gg}^*(\mu=1) + \Delta R_{gg}^*(\mu=1) \approx R_{gg}^*(\mu=1) + \\ &+ [R_{gg}^*(\mu=1) - R_{gg}^*(\mu=2)] = \\ &= 2R_{gg}^*(\mu=1) - R_{gg}^*(\mu=2). \end{aligned} \quad (27)$$

Таким образом, выражение (26) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} R_{X\epsilon}^*(\mu=0) &= R_{gg}^*(\mu=0) - [2R_{gg}^*(\mu=1) - R_{gg}^*(\mu=2)] = \\ &= R_{gg}^*(\mu=0) - 2R_{gg}^*(\mu=1) + R_{gg}^*(\mu=2). \end{aligned} \quad (28)$$

Следовательно, выражение для вычисления оценки релейной взаимно корреляционной функции $R_{X\epsilon}^*(\mu=0)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и ее помехой $\epsilon(i\Delta t)$ можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} R_{X\epsilon}^*(\mu=0) &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\operatorname{sgn} g(i\Delta t) g(i\Delta t) - \\ &- 2\operatorname{sgn} g(i\Delta t) g((i+1)\Delta t) + \operatorname{sgn} g(i\Delta t) g((i+2)\Delta t)]. \end{aligned} \quad (29)$$

Как было показано выше, по выражению (19) возможно вычисление оценки D_ϵ при $R_{X\epsilon}(\mu=0) \approx 0$. Однако при наличии корреляции между $X(i\Delta t)$ и $\epsilon(i\Delta t)$ применение этого выражения невозможно. В связи с этим, более подробно рассмотрим возможности определения D_ϵ при $R_{X\epsilon}(\mu=0) \neq 0$ с использованием оценок $R_{X\epsilon\epsilon}(\mu=0)$, $R_{X\epsilon}^*(\mu=0)$, $\Delta R_{gg}(\mu=0)$ и $\Delta R_{gg}^*(\mu=0)$.

Принимая во внимание условия (24) и равенства (25)–(29), можно написать:

$$\left. \begin{aligned} R_{X\epsilon}^*(\mu=0) + \Delta R_{XX}^*(\mu=0) &\approx \Delta R_{gg}^*(\mu=0), \\ R_{X\epsilon}(\mu=0) + R_{\epsilon\epsilon}(\mu=0) + \Delta R_{XX}(\mu=0) &\approx \Delta R_{gg}(\mu=0), \\ R_{X\epsilon}(\mu=0) + R_{\epsilon\epsilon}(\mu=0) + \Delta R_{gg}(\mu=1) &\approx \Delta R_{gg}(\mu=0). \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Из соотношений между оценками

$$R_{X\epsilon}^*(\mu=0); \quad R_{XX}^*(\mu=1)$$

и

$$R_{X\epsilon}(\mu=0); \quad \Delta R_{XX}(\mu=1),$$

а также из соотношений между оценками

$$R_{X\epsilon}^*(\mu=0); \quad \Delta R_{gg}^*(\mu=1)$$

и

$$R_{X\epsilon}(\mu=0); \quad \Delta R_{gg}(\mu=1)$$

можно допустить справедливость приближенных равенств:

$$\left. \begin{aligned} \frac{R_{X\epsilon}^*(\mu=0)}{\Delta R_{XX}^*(\mu=1)} &\approx \frac{R_{X\epsilon}(\mu=0)}{\Delta R_{XX}(\mu=1)}, \\ \frac{R_{X\epsilon}^*(\mu=0)}{\Delta R_{gg}^*(\mu=1)} &\approx \frac{R_{X\epsilon}(\mu=0)}{\Delta R_{gg}(\mu=1)}. \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

При этом получим равенство:

$$R_{X\epsilon}(\mu=0) \Delta R_{gg}^*(\mu=1) \approx R_{X\epsilon}^*(\mu=0) \Delta R_{gg}(\mu=1). \quad (32)$$

Следовательно, для случая, когда между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\epsilon(i\Delta t)$ имеет место корреляция оценку $R_{X\epsilon}(0)$, можно определить по формуле:

$$R_{X\epsilon}(\mu=0) \approx \frac{R_{X\epsilon}^*(\mu=0) \cdot \Delta R_{gg}(\mu=1)}{\Delta R_{gg}^*(\mu=1)}. \quad (33)$$

Понятно, что после определения оценки $R_{X\epsilon}(0)$ оценку дисперсии помехи D_ϵ можно определить как по выражению:

$$D_\epsilon = R_{\epsilon\epsilon}(\mu=0) \approx \Delta R_{gg}(\mu=0) - \Delta R_{gg}(\mu=1) - R_{X\epsilon}(\mu=0), \quad (34)$$

так и по выражению:

$$D_\epsilon = R_{X\epsilon\epsilon}(\mu=0) - R_{X\epsilon}(\mu=0), \quad (35)$$

где $R_{X\epsilon\epsilon}$ определяется по формуле (18).

5. Робастные корреляционные индикаторы начала зарождения АСП

Рассмотрим возможность регистрации начала периода T_1 изменения ССО по оценкам авто- и взаимнокорреляционных функций $R_{gg}(\mu)$ и $R_{g_j g_v}(\mu)$. Анализ специфики процесса вычисления этих оценок показывает, что их погрешность зависит от изменения спектра помехи $\epsilon(i\Delta t)$, и поэтому они не отвечают условиям робастности [2, 3]. Однако с увеличением временного сдвига $\mu \cdot \Delta t$ между $g(i\Delta t)$ и $g((i+\mu)\Delta t)$, а также между $g_j(i\Delta t)$ и $g_v((i+\mu)\Delta t)$ наступает момент, когда полученные оценки оказываются равными нулю. Если этот временной сдвиг обозначить через $\mu' \cdot \Delta t$, то при этом будут иметь место следующие очевидные равенства:

$$\left. \begin{aligned} R_{gg}(\mu') &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g((i+\mu')\Delta t) \approx 0, \\ R_{g_j g_v}(\mu') &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_j(i\Delta t)g_v((i+\mu')\Delta t) \approx 0. \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

При временном сдвиге $\mu' \cdot \Delta t$ погрешность оценок $R_{gg}(\mu)$ формируется из сумм погрешностей произведений $g(i\Delta t)g((i+\mu')\Delta t)$ с положительными и отрицательными знаками в количестве N^+ , N^- соответственно. Только при этом имеет место равенство $N^+ = N^-$. Благодаря этому выполняется условие робастности, так как положительные и отрицательные погрешности произведений практически компенсируются между собой. Следовательно, можно считать справедливым равенство:

$$\begin{aligned} R_{gg}^+(\mu=\mu') &\approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N^+} g(i\Delta t)g((i+\mu')\Delta t) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N^-} g(i\Delta t)g((i+\mu')\Delta t) \approx R_{gg}^-(\mu=\mu'). \end{aligned} \quad (37)$$

Понятно, что оценки взаимно корреляционной функции, т.е. $R_{g_j g_v}(\mu')$ также будут обладать свойством робастности, и для них также можно написать:

$$R_{g_j g_v}^+(\mu=\mu') = R_{g_j g_v}^-(\mu=\mu'). \quad (38)$$

В связи с вышеуказанным, в момент начала периода T_1 АСП равенства (32), (33) будут нарушаться, т. е.

$$R_{gg}^+(\mu=\mu') \neq R_{gg}^-(\mu=\mu'), \quad R_{g_j g_v}^+(\mu=\mu') \neq R_{g_j g_v}^-(\mu=\mu').$$

Поэтому в начале зарождения АСП оценки, полученные при временном сдвиге $\mu = \mu' \Delta t$, будут отличны от нуля, т. е.

$$R_{gg}(\mu') = R_{gg}^+(\mu') - R_{gg}^-(\mu') \neq 0, \quad (39)$$

$$R_{g_j g_v}(\mu') = R_{g_j g_v}^+(\mu') - R_{g_j g_v}^-(\mu') \neq 0. \quad (40)$$

Таким образом, в силу равенств (37), (38) влияние помехи на полученные оценки в период времени T_0 компенсируется, и тем самым обеспечивается их робастность. Только в начале изменения сейсмостойкости, а также при зарождении АСП, т.е. в начале временного интервала T_1 , из-за нарушения условия (1), оценки $R_{gg}(\mu')$ будут отличаться от нуля. Благодаря этому оценки $R_{gg}(\mu')$, $R_{g_j g_v}(\mu')$ можно считать надежными индикаторами, вычисление которых можно легко распараллеливать с определением оценок $R_{X\epsilon\epsilon}(\mu=0)$, $R_{X\epsilon}(\mu=0)$, D_ϵ .

Таким образом, в процессе функционирования системы из оценок сигналов $g_1(i\Delta t)$, вычисляемых по выражениям (36), формируются оценки робастных корреляционных индикаторов $R_{g_j g_v}(\mu')$, которые при исходном состоянии сейсмостойкости T_0 будут равны нулю. При изменении этого состояния, т. е. в начале периода T_1 они будут отличаться от нуля.

6. Робастная технология идентификации технического состояния и ССО

Для решения задачи идентификации сейсмостойкости, прежде всего, рассмотрим возможности применения для этой цели методов теории случайных процессов. Известно, что [17] состояние ССО в период времени T_1 в общем случае описывается матричными уравнениями типа.

$$\begin{aligned} \bar{R}_{XY}(\mu) &= \bar{R}_{XX}(\mu) \bar{W}(\mu), \\ \mu &= 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, (N-1)\Delta t, \end{aligned} \quad (41)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{R}_{XX}(\mu) &= \\ &= \begin{bmatrix} R_{XX}(0) & R_{XX}(\Delta t) & \dots & R_{XX}[(N-1)\Delta t] \\ R_{XX}(\Delta t) & R_{XX}(0) & \dots & R_{XX}[(N-2)\Delta t] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{XX}[(N-1)\Delta t] & R_{XX}[(N-2)\Delta t] & \dots & R_{XX}(0) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (42)$$

$$\bar{R}_{XY}(\mu) = [R_{XY}(0) \quad R_{XY}(\Delta t) \quad \dots \quad R_{XY}[(N-1)\Delta t]]^T, \quad (43)$$

$$\bar{W}(\mu) = [W(0) \quad W(\Delta t) \quad \dots \quad W((N-1)\Delta t)]^T. \quad (44)$$

$\bar{R}_{XX}(\mu)$ – квадратная симметричная матрица автокорреляционных функций размерностью $N \times N$ центрированного входного сигнала $X(t)$; $\bar{R}_{XY}(\mu)$ – вектор-столбец взаимокорреляционных функций между входом $X(t)$ и выходом $Y(t)$, m_X, m_Y – математические ожидания соответственно $X(t), Y(t)$; $\bar{W}(\mu)$ – вектор-столбец импульсных переходных функций.

Матрицы (42), (43), уравнения (41) сформированы из оценок полезных сигналов $X(t)$ и $Y(t)$. Однако при решении реальных задач эти матрицы формируются из оценок технологических параметров, которые представляют собой зашумленные сигналы $g_1(i\Delta t), g_2(i\Delta t), \dots, g_m(i\Delta t)$. Поэтому они содержат погрешности от помех $\epsilon_1(i\Delta t), \epsilon_2(i\Delta t), \dots, \epsilon_m(i\Delta t)$. Причем с изменением оценки дисперсии помехи и взаимно корреляционной функции между полезным сигналом и помехой их погрешности меняются. Следовательно, для обеспечения адекватности результатов идентификации технического состояния и сейсмостойкости объектов по матричному уравнению (41), прежде всего, необходимо обеспечение робастности оценок элементов этих матриц [17]. Для этого целесообразно применение технологии вычисления робастных оценок авто- и взаимокорреляционных функций по следующим выражениям:

$$R_{gg}^R(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g((i+\mu)\Delta t) - [N^+(\mu) - N^-(\mu)] \langle \Delta\lambda(\mu=0) \rangle; \quad (45)$$

$$R_{gn}^R(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)\eta((i+\mu)\Delta t) - [N^+(\mu) - N^-(\mu)] \langle \Delta\lambda(\mu=0) \rangle, \quad (46)$$

где

$$\left[\begin{aligned} |R_{gg}(\mu=1) - R_{gg}^*(\mu=1)| &= \lambda(\mu=1), \\ |R_{gn}(\mu=1) - R_{gn}^*(\mu=1)| &= \lambda(\mu=1), \end{aligned} \right] \quad (47)$$

$$\langle \Delta\lambda(\mu=1) \rangle = [1/N^-(\mu=1)]\lambda(\mu=1). \quad (48)$$

$R_{gg}(\mu=1), R_{gn}^*(\mu=1), R_{gn}(\mu=1), R_{gn}^*(\mu=1)$ являются оценками авто- и взаимокорреляционных функций центрированного и нецентрированного сигналов $g(i\Delta t), \eta(i\Delta t)$ соответственно.

$N^+(\mu), N^-(\mu)$ – количество произведений

$$g(i\Delta t)g(i+\mu)\Delta t \text{ или } g(i\Delta t)\eta(i\Delta t)$$

с положительными и отрицательными знаками соответственно.

Естественно, что когда элементы матриц (42), (43) будут формироваться из робастных оценок, по выражениям (45), (46) матричное уравнение (42) можно представить в виде.

$$\bar{R}_{gn}^R(\mu) \approx \bar{R}_{gg}^R(\mu)\bar{W}(\mu), \quad \mu = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, (N-1)\Delta t. \quad (49)$$

$$\bar{R}_{gg}^R(\mu) = \begin{bmatrix} R_{gg}^R(0) & R_{gg}^R(\Delta t) & \dots & R_{gg}^R[(N-1)\Delta t] \\ R_{gg}^R(\Delta t) & R_{gg}^R(0) & \dots & R_{gg}^R[(N-2)\Delta t] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{gg}^R[(N-1)\Delta t] & R_{gg}^R[(N-2)\Delta t] & \dots & R_{gg}^R(0) \end{bmatrix}, \quad (50)$$

При этом элементы матриц $\bar{R}_{gg}^R(\mu), \bar{R}_{gn}^R(\mu)$ представляют собой робастные оценки зашумленных сигналов т. е.:

$$\bar{R}_{gn}^R(\mu) = [R_{gn}^R(0)R_{gn}^R(\Delta t)\dots R_{gn}^R[(N-1)\Delta t]]^T. \quad (51)$$

Согласно работам [18], при вычислении корреляционной функций по выражениям (45), (46), погрешности от помех практически исключаются из робастных оценок элементов матриц (50), (51). Благодаря этому можно считать справедливым равенство:

$$\bar{W}(\mu) = \left[\begin{aligned} &W'(0) \quad W'(\Delta t) \quad \dots \quad W'[(N-1)\Delta t] \\ &W'(0) \approx W(0), W'(\Delta t) \approx W(\Delta t), \dots, W'[(N-1)\Delta t] \approx W[(N-1)\Delta t]. \end{aligned} \right]^T \quad (52)$$

Следовательно, при идентификации сейсмостойкости по матричному уравнению (49) можно предположить, что адекватность полученных результатов будет удовлетворительной.

В то же время нередко для реальных объектов, применяются также датчики, у которых сигналы на выходах зачастую представляют собой различные физические величины. Для тех случаев, когда на строительных объектах устанавливаются датчики для измерения различных физических величин (вибрации, давления, перемещения и т. д.), оценки корреляционных функций сигналов $g_1(i\Delta t), g_2(i\Delta t), \dots, g_n(i\Delta t)$ необходимо привести к безразмерным величинам.

Это осуществляется путем применения процедуры нормирования элементов матрицы (42), (43), (50), (51) [17, 18]. При этом только значения автокорреляционной функции при нулевом временном сдвиге $\mu=0$ оказываются безошибочными. Во всех остальных же случаях, то есть при временных сдвигах $\mu \neq 0$, для оценок автокорреляционных функций и при всех временных сдвигах μ для оценок взаимно корреляционных функций нормирование, к сожалению, приводит к появлению дополнительной погрешности от помехи. При этом в случае, когда имеется корреляция между полезным сигналом и помехой, величина погрешности оценки от нормирования в еще большей степени приводит к неадекватности решения вышеуказанных задач. В связи с этим необходимо создание технологии, обеспечивающей исключение погрешности оценок от нормирования.

7. Робастная технология нормирования оценок авто- и взаимокорреляционных функций

Как следует из вышеуказанного, для обеспечения адекватности результатов мониторинга и идентификации изменения ССО необходима разработка технологии, ориентированной на устранение погрешности от помехи, которая возникает при нормировании оценки

корреляционной функции как в случае, когда отсутствует корреляция между полезным сигналом и помехой, так и в случае ее наличия.

Рассмотрим один из возможных вариантов решения этой задачи. Известно, что нормированные авто- и взаимнокорреляционные функции полезных сигналов $X(t)$, $Y(t)$ вычисляются по формулам [18]:

$$r_{xx}(\mu) = R_{xx}(\mu) / D(x), \quad (53)$$

$$r_{xy}(\mu) = R_{xy}(\mu) / \sqrt{D(X)D(Y)}, \quad (54)$$

$$D(x) = R_{xx}(0), \quad D(y) = R_{yy}(0),$$

где $R_{xx}(\mu)$, $R_{xy}(\mu)$ – оценки авто- и взаимно корреляционных функций, оценки дисперсий сигналов $X(t)$, $Y(t)$; $\mu = 0, \mu = \Delta t, \mu = 2\Delta t, \mu = 3\Delta t, \dots$.

Соответственно, нормированные авто- и взаимнокорреляционные функции $r_{gg}(\mu)$, $r_{gn}(\mu)$ зашумленных сигналов, состоящих из суммы случайных полезных сигналов $X(t)$, $Y(t)$ и соответствующих помех $\varepsilon(t)$, $\phi(t)$

$$g(t) = X(t) + \varepsilon(t), \quad \eta(t) = Y(t) + \phi(t), \quad (55)$$

вычисляются по формулам:

$$r_{gg} = R_{gg}(\mu) / D(g), \quad (56)$$

$$r_{gn}(\mu) = R_{gn}(\mu) / \sqrt{D(g)D(\eta)}, \quad (57)$$

где

$$R_{gg}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g((i+\mu)\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t))(X((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon((i+\mu)\Delta t)), \quad (58)$$

$$R_{gn}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)\eta((i+\mu)\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t))(Y((i+\mu)\Delta t) + \phi((i+\mu)\Delta t)), \quad (59)$$

где $D(g) = R_{gg}(0)$, $D(\eta) = R_{nn}(0)$ – оценки дисперсий сигналов $g(t)$, $\eta(t)$; m_g , m_η – математические ожидания $g(t)$, $\eta(t)$.

Сравнивая выражения (53), (54) с выражениями (56), (57), можно заметить, что оценки нормированных авто- и взаимнокорреляционных функций полезных сигналов значительно отличаются от оценок нормированных авто- и взаимнокорреляционных функций зашумленных сигналов, то есть:

$$r_{gg}(\mu) \neq r_{xx}(\mu), \quad (60)$$

$$r_{gn}(\mu) \neq r_{xy}(\mu). \quad (61)$$

Поэтому необходимо создание таких робастных технологий вычисления оценок нормированных авто-

и взаимнокорреляционных функций $r_{gg}^R(\mu)$, $r_{gn}^R(\mu)$, которые обеспечили бы выполнение равенств

$$r_{gg}^R(\mu) \approx r_{xx}(\mu), \quad (62)$$

$$r_{gn}^R(\mu) \approx r_{xy}(\mu), \quad (63)$$

как для случая, когда имеется корреляция между полезными сигналами и помехами, так и в случае, когда корреляция равна нулю.

Для этого сначала рассмотрим источники погрешности, которые возникают при вычислении оценок нормированных корреляционных функций.

Примем во внимание, что значения $\varepsilon(i\Delta t)$ и $\varepsilon((i+\mu)\Delta t)$ при $\mu \neq 0$ не коррелируют между собой, то есть:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t) \approx 0 \text{ при } \mu \neq 0 \quad (64)$$

и среднее значение квадратов значений помехи равно оценке дисперсии $D(\varepsilon)$ помехи $\varepsilon(i\Delta t)$, то есть:

$$D(\varepsilon) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t), \quad (65)$$

тогда при наличии корреляции между полезным сигналом $X(t)$ и помехой $\varepsilon(t)$ при временном сдвиге $\mu = 0$ и отсутствии ее при $\mu \neq 0$, то есть

$$R_{x\varepsilon}(\mu = 0) \neq 0, \quad R_{\varepsilon x}(\mu = 0) \neq 0, \\ R_{x\varepsilon}(\mu \neq 0) = 0, \quad R_{\varepsilon x}(\mu \neq 0) = 0. \quad (66)$$

Выражение вычисления $R_{gg}(\mu)$ можно соответственно записать в следующем виде:

$$R_{gg}(\mu = 0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g(i\Delta t) = R_{xx}(\mu = 0) + 2R_{x\varepsilon}(\mu = 0) + D(\varepsilon), \quad (67)$$

$$R_{gg}(\mu \neq 0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g((i+\mu)\Delta t) = R_{xx}(\mu \neq 0), \quad (68)$$

где

$$R_{x\varepsilon}(\mu = 0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t). \quad (69)$$

Из формулы (67) очевидно, что при наличии корреляции между полезным сигналом и помехой погрешность оценки корреляционной функции при $\mu = 0$ равна сумме удвоенной оценки взаимнокорреляционной функции $R_{x\varepsilon}(\mu = 0)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ и дисперсии $D(i\Delta t)$ помехи $\varepsilon(i\Delta t)$. При всех остальных временных сдвигах $\mu \neq 0$ оценки автокорреляционной функции $R_{gg}(\mu \neq 0)$ зашумленного сигнала совпадают с оценками автокорреляционной функции $R_{xx}(\mu \neq 0)$ полезного сигнала $X(i\Delta t)$, т. е. выполняется равенство:

$$R_{gg}(\mu \neq 0) \approx R_{XX}(\mu \neq 0). \tag{70}$$

При этом в результате нормирования при нулевом временном сдвиге $\mu=0$ нормированные корреляционные функции как полезного сигнала $X(i\Delta t)$, так и зашумленного сигнала $g(i\Delta t)$, совпадают и равны единице

$$r_{XX}(\mu=0) = r_{gg}(\mu=0) = 1. \tag{71}$$

С учетом выражений (53), (56), (67) очевидно, что при $\mu \neq 0$ формула определения оценки нормированной автокорреляционной функции зашумленного сигнала $g(i\Delta t)$ имеет вид:

$$\begin{aligned} r_{gg}(\mu \neq 0) &= \frac{R_{gg}(\mu \neq 0)}{D(g)} = \\ &= \frac{R_{gg}(\mu \neq 0)}{R_{XX}(\mu=0) + 2R_{X\varepsilon}(\mu=0) + D(\varepsilon)}. \end{aligned} \tag{72}$$

Таким образом, при наличии корреляции между полезным сигналом $X(t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ оценки нормированной автокорреляционной функции $r_{gg}(\mu \neq 0)$ зашумленного сигнала $g(i\Delta t)$ при временных сдвигах $\mu \neq 0$ отличаются от оценок нормированной автокорреляционной функции $r_{XX}(\mu \neq 0)$ полезного сигнала $X(i\Delta t)$ на удвоенную величину взаимнокорреляционной функций $R_{X\varepsilon}(\mu=0)$ и величину дисперсии помехи $D(i\Delta t)$ в подкоренном выражении знаменателя. Из-за этого имеет место неравенство (60).

Из формулы (59) очевидно, что оценки взаимнокорреляционных функций $R_{gn}(\mu)$ зашумленных сигналов $g(i\Delta t)$, $\eta(i\Delta t)$ при отсутствии корреляции между полезными сигналами $X(i\Delta t)$, $Y(i\Delta t)$ и помехами $\varepsilon(i\Delta t)$, $\phi(i\Delta t)$, а также между самими помехами $\varepsilon(i\Delta t)$ и $\phi(i\Delta t)$, то есть при выполнении условий:

$$R_{X\varepsilon}(\mu) \approx 0, R_{Y\phi}(\mu) \approx 0, R_{\varepsilon\phi}(\mu) \approx 0, \tag{73}$$

при всех временных сдвигах практически совпадают с оценками взаимнокорреляционной функции $R_{XY}(\mu)$ полезных сигналов, т. е. выполняется равенство:

$$R_{gn}(\mu) \approx R_{XY}(\mu). \tag{74}$$

Однако при наличии корреляции между полезными сигналами $X(i\Delta t)$, $Y(t)$ и помехами $\varepsilon(i\Delta t)$, $\phi(t)$ при временных сдвигах $\mu=0$ и $\mu \neq 0$ имеет место соотношение:

$$\begin{aligned} R_{Y\phi}(\mu=0) \neq 0, R_{\phi Y}(\mu=0) \neq 0, \\ R_{Y\phi}(\mu \neq 0) = 0, R_{\phi Y}(\mu \neq 0) = 0. \end{aligned} \tag{75}$$

При этом формула (57) вычисления оценок нормированных взаимнокорреляционных функций приобретает вид:

$$\begin{aligned} r_{gn}(\mu) &= \frac{R_{gn}(\mu)}{\sqrt{D(g) \cdot D(\eta)}} = \\ &= \frac{R_{gn}(\mu)}{\sqrt{[D(X) + 2R_{X\varepsilon}(0) + D(\varepsilon)] \cdot [D(Y) + 2R_{Y\phi}(0) + D(\phi)]}}. \end{aligned} \tag{76}$$

Следовательно, оценки нормированной взаимнокорреляционной функции $r_{gn}(\mu)$ зашумленных сигналов $g(i\Delta t)$, $\eta(i\Delta t)$ при всех временных сдвигах μ отличаются от оценок нормированной взаимнокорреляционной функции $r_{XY}(\mu)$ полезных сигналов $X(i\Delta t)$, $Y(i\Delta t)$ на удвоенную величину взаимнокорреляционных функций $R_{X\varepsilon}(\mu=0)$, $R_{Y\phi}(\mu=0)$ и величину дисперсий помех $D(\varepsilon)$, $D(\phi)$ в подкоренном выражении знаменателя. Из-за этого имеет место неравенство (61).

При наличии корреляции между полезным сигналом $X(t)$ и помехой $\varepsilon(t)$, формулу вычисления робастных оценок нормированных автокорреляционных функций при временных сдвигах $\mu=0$, $\mu=\Delta t$, $\mu=2\Delta t$, $\mu=3\Delta t$, ... можно представить в виде:

$$r_{gg}^R(\mu) = \begin{cases} 1, \\ \frac{R_{gg}(\mu)}{R_{gg}(0) - R_{X\varepsilon}(0)}. \end{cases} \tag{77}$$

Для случая, когда имеется корреляция между полезными сигналами $X(t)$, $Y(t)$ и помехами $\varepsilon(t)$, $\phi(t)$, формулу (76) определения робастных оценок нормированной взаимнокорреляционной функции $r_{gn}^R(\mu)$ при временных сдвигах 0 , Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$, ... можно представить в виде:

$$r_{gn}^R(\mu) = R_{gn}(\mu) / \sqrt{(D(g) - D_\varepsilon)} \sqrt{(D(\eta) - D_\phi)}, \tag{78}$$

или

$$r_{gn}^R(\mu) = \frac{R_{gn}(\mu)}{\sqrt{[R_{gg}(0) - R_{X\varepsilon}(0)][R_{\eta\eta}(0) - R_{g\phi\phi}(0)]}}. \tag{79}$$

Таким образом, применение разработанной робастной технологии при вычислении оценок по выражениям (77), (79) практически исключает погрешности нормирования, вызванные помехами, как при наличии корреляции между полезным сигналом и помехой, так и при ее отсутствии. В результате появляется возможность формирования корреляционных матриц из оценок нормированных корреляционных функций, в которых устранена погрешность от влияния помехи.

Благодаря этому для случая, когда технологические параметры представляют собой различные физические величины, для обеспечения адекватности полученных результатов задачу идентификации целесообразно решить при помощи матричного уравнения вида:

$$\bar{r}_{gn}^R(\mu) = \bar{r}_{gg}^R(\mu) \bar{W}(\mu), \tag{80}$$

$$\mu(\Delta t) = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, (N-1)\Delta t,$$

где

$$\bar{r}_{ss}^{-R}(\mu) = \begin{bmatrix} r_{ss}^R(0) & r_{ss}^R(\Delta t) & \dots & r_{ss}^R[(N-1)\Delta t] \\ r_{ss}^R(\Delta t) & r_{ss}^R(0) & \dots & r_{ss}^R[(N-2)\Delta t] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{ss}^R[(N-1)\Delta t] & r_{ss}^R[(N-2)\Delta t] & \dots & r_{ss}^R(0) \end{bmatrix}, \quad (81)$$

$$\bar{r}_{sn}^{-R}(\mu) = [r_{sn}^R(0) \ r_{sn}^R(\Delta t) \ \dots \ r_{sn}^R(N-1)\Delta t], \quad (82)$$

$$\bar{W}^*(\mu) = [W^*(0) \ W^*(\Delta t) \ \dots \ W^*((N-1)\Delta t)]^T. \quad (83)$$

При этом применение предложенной технологии нормирования элементов этих матриц по выражениям (77), (79) практически исключает погрешности от помех.

Следовательно, можно считать справедливым следующее равенство

$$\begin{aligned} W^*(0) &\approx W(0), \quad W^*(\Delta t) \approx W(\Delta t), \quad \dots, \\ W^*(N-1)\Delta t &\approx W(N-1)\Delta t. \end{aligned} \quad (84)$$

Благодаря этому можно допустить, что адекватность результатов идентификации по матричному уравнению (80) будет совпадать с результатом, полученным по уравнению (36).

8. Интеллектуальная распределенная система помехомониторинга ССО

Как это видно из рис. 1, в рассматриваемую систему входят центр мониторинга (ЦМ), сейсмоакустическая станция робастного Noise мониторинга аномальных сейсмических процесс (RNMASP) и локальные устройства помехомониторинга сейсмостойкости (ЛУПС) $L_{11}, L_{12}, \dots, L_{1n}, \dots, L_{nm}$, которые устанавливаются во всех контролируемых строительных объектах. На рис. 1 совокупность ЛУПС-ов с передающими антеннами представляет собой распределенную систему помехомониторинга ССО.

При создании системы каждый социально-значимый и стратегический объект снабжается ЛУПС-ами, которые построены на базе контроллеров и соответствующих датчиков, установленных в наиболее уязвимых конструкциях объекта.

ЛУПС-ы функционируют автономно. В процессе функционирования системы мониторинга из характеристик сигналов $g_1(i\Delta t), g_2(i\Delta t), \dots, g_m(i\Delta t)$, получаемых от соответствующих датчиков, определяемых по выражениям (18), (19), (29), формируется комбинация оценок $R_{x_{\text{св}}}(0), R_{x_{\text{св}}}^*(0), R_{x_{\text{св}}}^+(0), D_{\text{св}}$, которые при исходной нормальной сейсмостойкости объекта будут равны нулю. При отклонении сейсмостойкости от исходной в начале периода T_1 они будут отличаться от нуля. Аналогичным образом в момент зарождения АСП в начале времени T_1 они также будут отличаться от нуля. Таким образом, в период времени T_0 в ЛУПС-е каждого объекта из указанных оценок формируются множества информативных признаков, которые используются как удобные и надежные индикаторы.

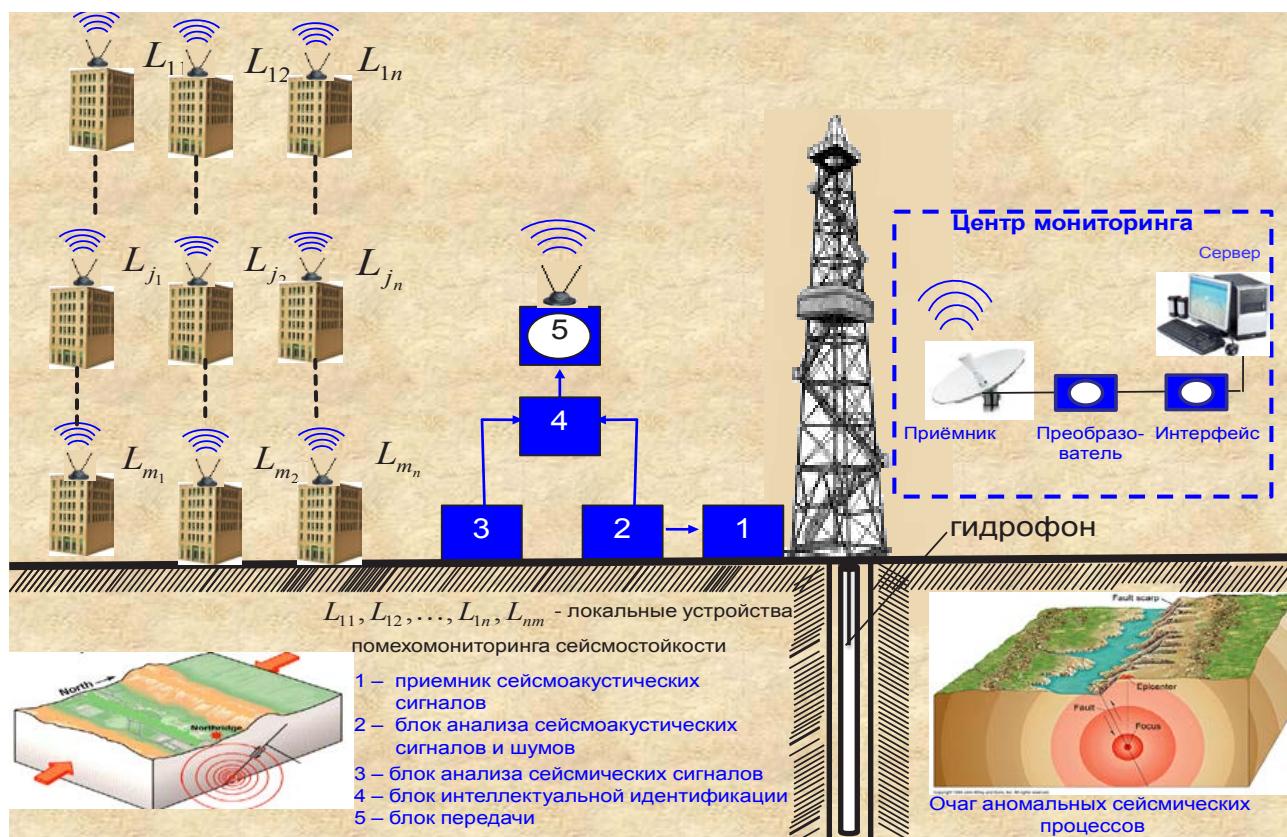


Рис. 1. Интеллектуальная робастная распределенная система помехомониторинга ССО

$$W_{X_{\epsilon}} = \begin{Bmatrix} R_{X_{\epsilon_1 \epsilon_1}}(0) & R_{X_{\epsilon_2 \epsilon_2}}(0) & \dots & R_{X_{\epsilon_j \epsilon_j}}(0) & \dots & R_{X_{\epsilon_m \epsilon_m}}(0) \\ R_{X_{\epsilon_1}}(0) & R_{X_{\epsilon_2}}(0) & \dots & R_{X_{\epsilon_j}}(0) & \dots & R_{X_{\epsilon_m}}(0) \\ R_{X_{\epsilon_1}}^*(0) & R_{X_{\epsilon_2}}^*(0) & \dots & R_{X_{\epsilon_j}}^*(0) & \dots & R_{X_{\epsilon_m}}^*(0) \\ D_{\epsilon_1} & D_{\epsilon_2} & \dots & D_{\epsilon_j} & \dots & D_{\epsilon_m} \end{Bmatrix}. \quad (85)$$

В случае изменения сейсмостойкости объекта некоторые элементы этих множеств будут отличаться от нуля. Этот момент будет зарегистрирован и передан по радиоканалу соответствующего ЛУПС-а на сервер центра мониторинга.

Кроме того, для повышения достоверности результатов мониторинга по выражениям (31), (32) целесообразно также формировать множества индикаторов из робастных оценок авто- и взаимнокорреляционных функций сигнала $g_1(i\Delta t), g_2(i\Delta t), \dots, g_m(i\Delta t)$ в виде:

$$W_{g_i, g_j} = \begin{Bmatrix} R_{g_i g_i}^R(\mu') & R_{g_i g_2}^R(\mu') & R_{g_i g_3}^R(\mu') & R_{g_i g_4}^R(\mu'), \dots, R_{g_i g_j}^R(\mu'), \dots, R_{g_i g_m}^R(\mu') \\ R_{g_2 g_i}^R(\mu') & R_{g_2 g_2}^R(\mu') & R_{g_2 g_3}^R(\mu') & R_{g_2 g_4}^R(\mu'), \dots, R_{g_2 g_j}^R(\mu') \dots R_{g_2 g_m}^R(\mu') \\ R_{g_3 g_i}^R(\mu') & R_{g_3 g_2}^R(\mu') & R_{g_3 g_3}^R(\mu') & R_{g_3 g_4}^R(\mu'), \dots, R_{g_3 g_j}^R(\mu'), \dots, R_{g_3 g_m}^R(\mu') \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{g_j g_i}^R(\mu') & R_{g_j g_2}^R(\mu') & R_{g_j g_3}^R(\mu') & R_{g_j g_4}^R(\mu'), \dots, R_{g_j g_j}^R(\mu'), \dots, R_{g_j g_m}^R(\mu') \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{g_m g_i}^R(\mu') & R_{g_m g_2}^R(\mu') & R_{g_m g_3}^R(\mu') & R_{g_m g_4}^R(\mu'), \dots, R_{g_m g_j}^R(\mu'), \dots, R_{g_m g_{m-1}}^R(\mu') \end{Bmatrix}. \quad (86)$$

где μ' – временные сдвиги между $g(i\Delta t)$ и $g(i+\mu')\Delta t$, при которых оценки $R_{g_i g_j}^R(\mu')$ в период времени T_0 будут равны нулю.

В момент нарушения сейсмостойкости, отличие даже одного элемента этих множеств от нуля, в ЛУПС-е каждого объекта воспринимается как начало периода времени T_1 . При этом по номерам множества, столбца и строки отличного от нуля информативного признака можно идентифицировать место и характер деформации в данном объекте. Одновременно с этим ЛУПС также сигнализирует об этом сервер центра мониторинга.

Кроме этого в каждом ЛУПС-е из отсчетов сигналов $g_1(i\Delta t), g_2(i\Delta t), \dots, g_m(i\Delta t)$ каждого объекта в каждом цикле формируются файлы. Они совместно с множествами (85), (86) через модемы и средства радиосвязи передаются в модем сервера центра мониторинга. В процессе эксплуатации, в течение времени T_0 на сервере для каждого объекта кроме множеств (85), (86) также на основе выражений (77)–(79) формируются робастные нормированные корреляционные матрицы. Кроме того, на сервере также предусмотрена возможность формирования множества, состоящего из позиционно-бинарных и спектральных индикаторов. Технологии их формирования подробно приведены в работах [17, 18]. Таким образом, в процессе обучения происходит формирование эталонных множеств и корреляционных матриц, которые являются носителями информации о состоянии исходной сейсмостойкости всех контролируемых объектов.

В процессе эксплуатации в режиме мониторинга в каждом цикле по текущим отсчетам сигналов $g_1(i\Delta t), g_2(i\Delta t), \dots, g_m(i\Delta t)$ определяются текущие оценки элементов указанных множеств и матриц, при

помощи которых они формируются и сравниваются с оценками соответствующих эталонных множеств и матриц, зафиксированных в процессе обучения. Если при этом их разность не превышает допустимый минимальный диапазон, то считается, что сейсмостойкость и техническое состояние соответствующего объекта не изменилась. В противном случае, по результату, полученному на сервере, формируется сигнал, показывающий начало изменения сейсмостойкости соответствующего объекта. При повторных циклах, если текущие оценки опять отличаются от эталонных, на сервере принимается решение отнести данный объект к группе, требующей привлечения мобильных систем контроля и диагностики, при помощи которых производится окончательный анализ, а также принятие решения.

В случае обнаружения одно-временного отклонения сейсмостойкости от нормальной у близко расположенных групп объектов, на сервере формируется сигнализация о начале оползня.

Кроме того, в системе также предусмотрен контроль за нарушением техники безопасности. Например, при аварии лифта, утечке газа, коротком замыкании в электропитании и т. д. в объектах мониторинга на сервере формируется соответствующая сигнализация с указанием характера нарушения и номера объекта.

9. Интеллектуальная система получения сейсмоакустической информации от глубинных пластов земли и помехомониторинга АСП

Схема сейсмоакустической станции робастного Noise мониторинга АСП также приведена на рис. 1. Для получения информации от глубинных сейсмопроцессов в качестве канала связи используются законсервированные нефтяные скважины. Блок 1 состоит из акустических (гидрофон) датчиков, которые устанавливаются на устье скважины. В блоке 2 по выражениям (17)–(20), (29) анализируется сейсмоакустический сигнал, полученный при помощи гидрофона, установленного на устье скважины, и определяются соответствующие оценки $R_{X_{\epsilon}}(\mu=0)$, $R_{X_{\epsilon}}(\mu=0)$, D_{ϵ} , $R_{X_{\epsilon}}^*(\mu=0)$. Этот блок выполняет функцию помехоанализа сейсмоакустического сигнала. Блок 3 представляет собой стандартную сейсмоаппаратуру, позволяющую фиксировать и оценивать силу сейсмоколебаний в момент землетрясения. Блок 4 выполняет функцию интеллектуальной идентификации АСП с использованием результатов регистрации землетрясений на блоке 3 и на станциях сейсмической службы [14, 15].

В блоке 4 системы на начальном этапе выполняется режим обучения. Для этого в блоке 2 по алгоритмам (17)–(20), (29) определяются соответствующие оценки сейсмоакустических сигналов, полученных от гидрофонов блока 1. На начальном этапе ее функционирования в течение длительного времени T_0 в блоке 2

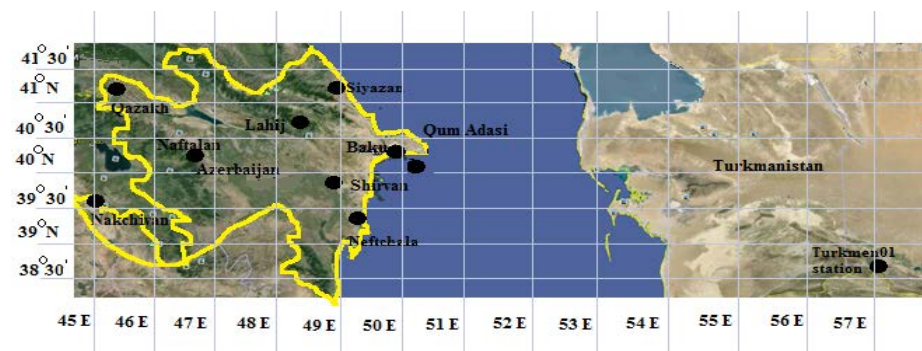
формируются и запоминаются эталонные множества указанных оценок. В дальнейшем, при работе системы в каждом цикле, в результате анализа по алгоритмам (17), (20), (29), определяются текущие оценки информативных признаков. Одновременно с этим в течение времени T_0 также определяются оценки сигналов наземной сейсмоаппаратуры 3. Они также регистрируются как эталонные множества оценок. По истечении времени T_0 этот процесс продолжается до того момента, пока текущие оценки сигнала, полученные от гидрофонов, не будут отличаться от оценок эталонных множеств на величину большую установленных пороговых уровней.

В процессе функционирования сейсмоакустической станции соответствующая информация также передается на сервер центра мониторинга системы, где вышеописанный процесс формирования множества и мониторинга начала зарождения АСП повторяется. Таким образом, в системе в начале времени T_1 по оценкам сейсмоакустического сигнала, полученного от выхода гидрофона, установленного на устье стального ствола скважины, формируется информация о начале АСП. В то же время по оценкам, получаемым от сигналов стандартными наземными станциями только в начале времени T_2 , блок 3 определяет магнитуды сейсмоколебаний. Информация об этом также передается в блок 4, где определяется разность времени получения соответствующих сигналов в блоках 2 и 3 соответственно. Как на сервере, так и в блоке 4 в процессе обучения параллельно начинается идентификация АСП, используя известные технологии распознавания, в том числе нейросетевые. Проведенные эксперименты показали, что каждая такая станция позволяет регистрировать предшествующий землетрясению АСП более чем за 10–15 часов до начала землетрясения в радиусе 300–500 км. Эта позволяет использовать эти станции для мониторинга изменения сейсмической ситуации на контролируемой территории.

Анализ результата экспериментов при определении зоны ожидаемого землетрясения показал, что для повышения надежности и достоверности полученных результатов необходимо увеличение количества станций RNM ASP.

Начиная с 2010.07. 01, для проведения широкомасштабных экспериментов по мониторингу АСП, как это показано на рис. 2, поочередно были введены

в эксплуатацию станции RNM ASP Гум Адасы (Каспийское море), Ширван, Сиазань, Нафталан, Нефчала, Нахичевань (на границах Ирана и Турции), Копетдаг (Туркменистан), Газах (на границе Грузии), Нахичевань, Лагич, Лерик, Кибернетик (Баку). Последние четыре станции построены на водяных скважинах глубиной 300 м, 200 м и 10 м соответственно. Эти станции строились на тех скважинах, где трубы самотеком заполнялись водой. Гидрофоны опускаются на глубину 10–20 метров от уровня водяного столба. Анализ сейсмоакустических сигналов, полученных этими станциями, показал, что при зарождении АСП сейсмоакустические шумы, которые распространяются на несколько десятков часов раньше, чем сейсмические волны ими регистрируются также как глубинными нефтяными скважинами. В системе оценки поise характеристик получаемых в результате мониторинга станциями синхронно передаются на сервер ЦМ. Сеть построенных станций имеют следующие глубину скважины и географические координаты.



1	Qum Adasi	40.310425°	50.008392°	3500 m	July	2010
2	Siyazan	41.046217°	49.172058°	3145 m	November	2011
3	Shirvan	39.933170°	48.920745°	4900 m	November	2011
4	Naftalan	40.609521°	46.791458°	4000 m	May	2012
5	Neftchala	39.358333°	49.246667°	1430 m	June	2012
6	Nakchivan	39.718000°	44.876000°	1800 m	March	2013
7	Qazakh	41.311889°	45.100278°	200 m	August	2013
8	Turkmanistan	38.530089°	56.654472°	300 m	August	2013
9	Baku (Cybernetics)	40.375700°	49.810833°	10 m	February	2014
10	Lahij	40.511160°	48.233520°	38 m	September	2014
11	Lerik	38.441900°	48.254040°	42 m	November	2014

Рис. 2. Карта месторасположения RNM ASP станций

Результат эксплуатации этих станций показал, что каждая из них в отдельности дает возможность надежно осуществить индикацию процесса зарождения АСП, предшествующих землетрясению [13].

По полученным результатам мониторинга формируются комбинации последовательности времен ин-

дикации, которые используются как исходные данные для выявления зоны ожидаемого землетрясения.

Эксперименты на указанных станциях с 2010.07.01 по 2014.06.01 показали, что в Азербайджане и близлежащих регионах в радиусе 300–500 км вокруг сети станций RNM ASP имеются следующие активные зоны землетрясений:

- I. Туркменская сторона Каспийского моря;
- II. В Каспийском море южнее Апшеронского полуострова;
- III. В Каспийском море севернее Апшеронского полуострова;
- IV. В Ширванской зоне Азербайджана;
- V. В северо-западной зоне Азербайджана;
- VI. В Южной зоне Азербайджана;
- VII. На юге Кавказского региона Российской Федерации;
- VIII. На северо-востоке Иранской республики;
- IX. В северо-западном регионе Иранской республики (в окрестностях Тебриза);
- X. На границе Ирана, Ирака и Турции;
- XI. Северный регион Ирана;
- XII. Восточный регион Турции;
- XIII. Западная зона Грузии (Черное море).

В этих зонах в последние 1,5–2 года произошли многочисленные землетрясения магнитудой более 3–4 балла. При этом для каждой зоны комбинации последовательности времени регистрации АСП станциями Гум Адасы, Ширван, Сиязань, Нефтчала, Нафталян, Лагич, Лерик и Нахичевань практически повторились. Проведенный анализ записи графиков показал, что каждая комбинация последовательности времени индикации текущих АСП соответствует одному из конкретных зон землетрясений. Опыт их эксплуатации также показал, что полученные результаты при помощи сети этих станций открывает возможность создания интеллектуальной технологии выявления зоны ожидаемого землетрясения. При этом стало очевидным, что сеть этих станций может быть использована как инструмент для выявления зоны ожидаемого землетрясения.

10. Результаты экспериментов по выявлению зон ожидаемых землетрясений

После завершения, пуска и наладки всех вышеуказанных станций, начиная с 2014.01.01 по 2014.07.02, было проведено опытные испытания рассматриваемой системы. За это время при выявлении зоны некоторые ошибки были обнаружены при землетрясениях менее 2.5–3.5 балла. Кроме того при сбое в системе электропитания, в системе связи и также при неисправности гидрофона, контроллера и других узлов одновременно на 2–3-х станциях RNM ASP также были обнаружены ошибочные результаты выявления зоны ожидаемого землетрясения. В результатах выявления зоны ожидаемого землетрясения с мощностью более 5 баллов при нормальном состоянии функционирования всех станций RNM ASP не были обнаружены ошибки.

Перечень зон ожидаемых землетрясений выявленных по заархивированным результатам мониторинга с 2013 по 2014 годы занимает много места. Поэтому ниже на рисунках приводятся результаты 11 выявленных зон ожидаемых землетрясений с 2013.01.01 по 2014.07.06 только с магнитудой более 5 баллов. На рис. 3–12 представлены записи графиков АСП, которые предшествовали этих землетрясений.

В этих графиках показано местное Бакинское время, которое опережает UTC на 4 часа зимой и 5 часов летом.

На рис. 3 приведены результаты выявления VII зоны землетрясения, которая произошла в Грузии в 2013.03.26. Из рис. 3 следует, что при этом временное распределение индикации начало станциями RNM ASP имеет последовательность: Siyezen-04:15; Qum Adasy-04:30; Shirvan-06:50; Neftchala-08:30. Системой выявлено, что это соответствует VII зоне. При этом время опережения до землетрясения составляет 8–10 часов.

На рис. 4 приведены результаты выявления VII зоны землетрясения, которые произошло в 2013.05.27, 2013.05.28 в Грузии.

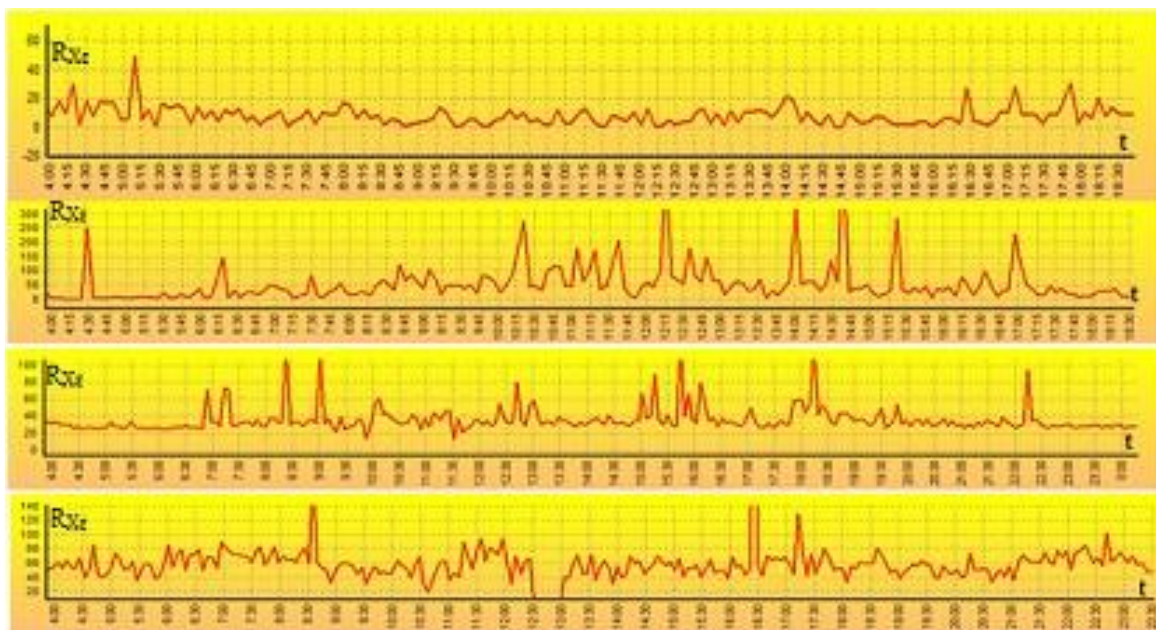


Рис. 3. VII зона – Siyezen, Qum Adasy, Shirvan, Neftchala 2013-03-26 Грузия-Россия

Как видно из графика, станциями RNM ASP Siyezen, Naftalan, Shirvan, Qum Adasy более чем за 20 часов до начала землетрясение регистрировали зарождения ASP. На графиках видно, что северные (Siyezen) и северо-западные (Qum Adasy) станции зафиксировали аномалии раньше других. При этом имело место следующее временное распределения индикации начало станциями RNM ASP: Naftalan-07:30; Siyezen-09:10; Shirvan-09:45; Qum Adasy-11:40. Благодаря этому системой зона землетрясения выявлена примерно к 18 часу Бакинскому времени, что почти 10–11 часов опережает времени регистрации землетрясений наземными станциями.

На рис. 5 приведены результаты выявления VII зоны двух подряд произошедших землетрясений в 2013.09.16 на юге России.

Как видно из графиков, эти землетрясения (рис. 5) зарождения АСП имело место на юго-востоке Кавказского региона, которые были зарегистрированы в следующем последовательности: Siyezen-05:30, Qum Adasy-08:00, Qazax-10:00, Neftchala-14:30. На основе этой комбинации временного распределения регистрации системой была выявлена VII зона землетрясения, которая соответствует северо-востоку Азербайджана, где действительно в 16–17 часах по Бакинскому времени произошло землетрясение. Время выявления зоны опережало землетрясение примерно на 15 часов.

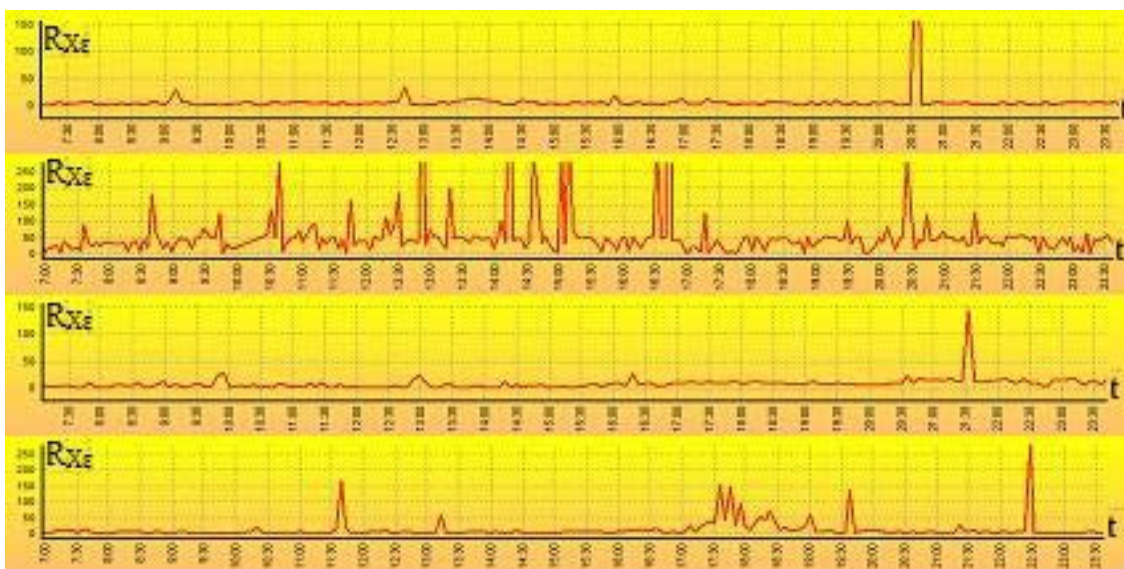


Рис. 4. VII зона – Siyezen, Naftalan, Shirvan, Qum Adasy 2013-05-27 2013-05-28 00:09:52.0 UTCmb 5.2 Грузия (Sak'art'velo)

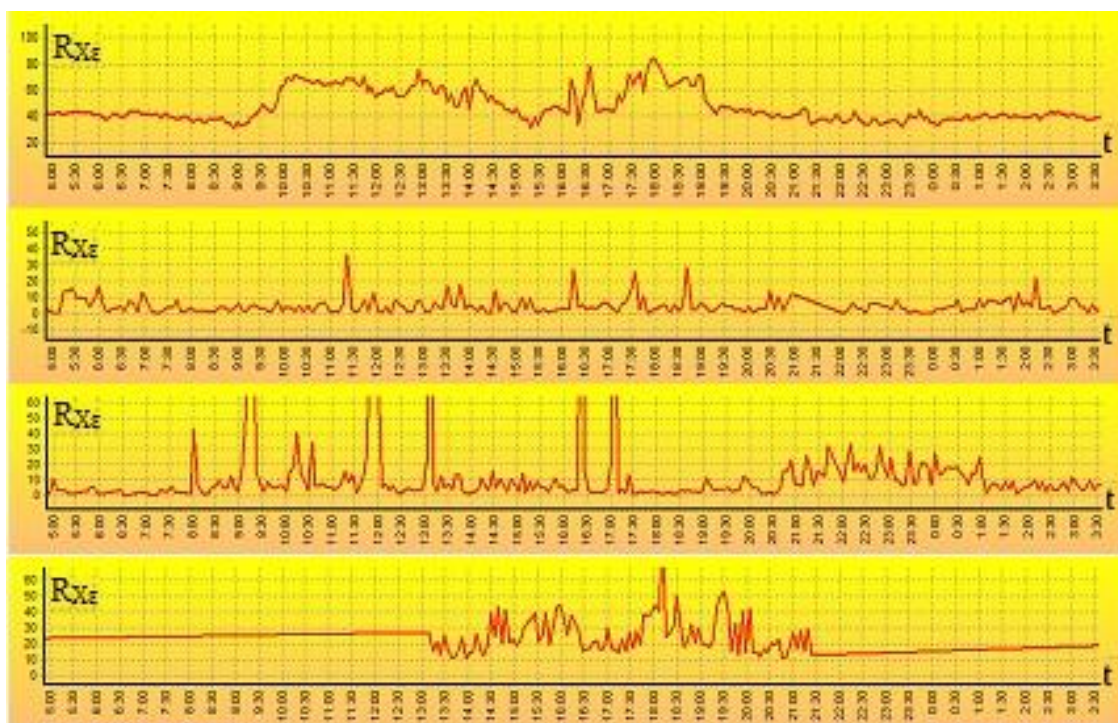


Рис. 5. VII зона – Qazax, Siyezen, Qum Adasy, Neftchala 2013-09-16 42.17 N ; 45.89E Россия

Как это видно из графика на рис. 6 по комбинациям времен регистрации станциями Naxchvan-08:00; Qum Adasy-09:00; Neftchala-08:50, системой выявлен X зона ожидаемого землетрясения на 12 часов с опережением на границе Иран-Ирак.

На рис. 7 приведен результат выявления системой 2014.01.09 местонахождение III зоны землетрясения к 12 часам, которая произошла на Caspian Sea, Offshore Azerbaijan, и была зарегистрирована станциями Turkmen01-09:15, Qum Adasu-09:25, Siyezen-09:45, Neftchala-11:15 за 16 часов до землетрясения (рис. 7).

На рис. 8 системой выявлена I зона ожидаемого землетрясения, который находился в Туркменистане. Как это видно из графика на рис. 8, система по комбинациям последовательности времен индикации стан-

циями Neftchala-09:30, Siyezen-10:45, Qum Adasy-11:30 показало, что местонахождение ожидаемого землетрясения находится в Туркменистане, т.е. на I зоне на востоке Азербайджана. Время, когда был выявлена зона ожидаемого землетрясения, опережало время ее регистрации более чем на 24 часа.

На рис. 9 приводятся результаты выявления IX зоны землетрясения, которое произошло в Западном Иране. Как это видно на рис. 9, при этом имела место комбинация времен регистрации станциями: Qum Adasy-09:45, Shirvan-07:30, Naxchvan-04:50 и Neftchala-11:20 (TTTT), что позволило системе выявить IX зону ожидаемого землетрясения, которая находится в Западном Иране.

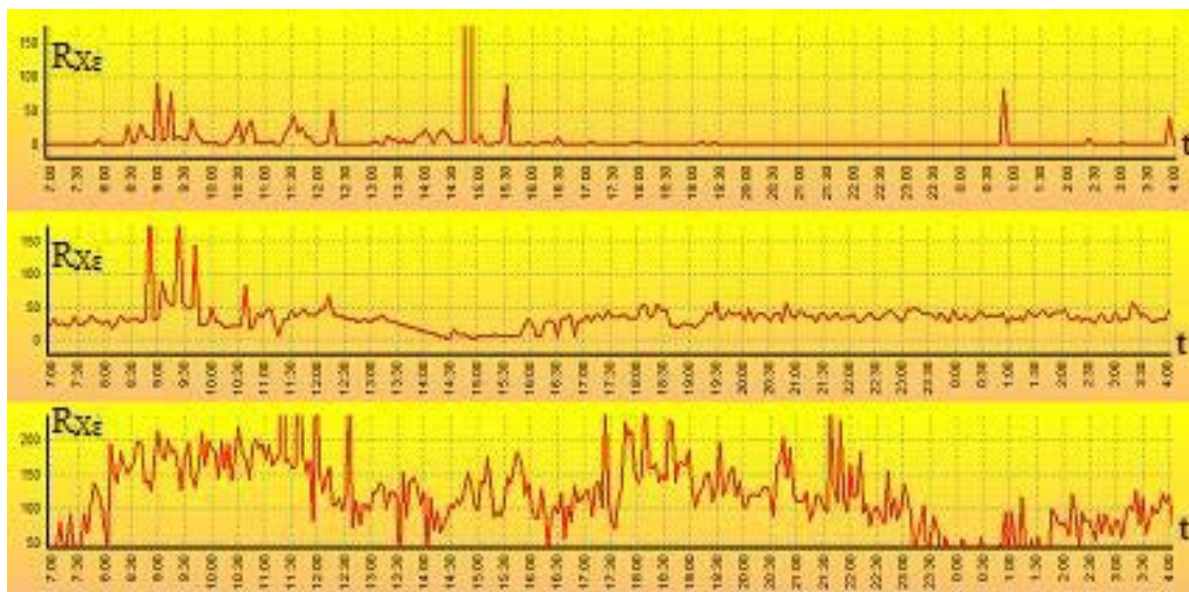


Рис. 6. X зона – Qum Adasy, Neftchala, Naxchvan 2013-11-21 Граница Ирана и Ирака

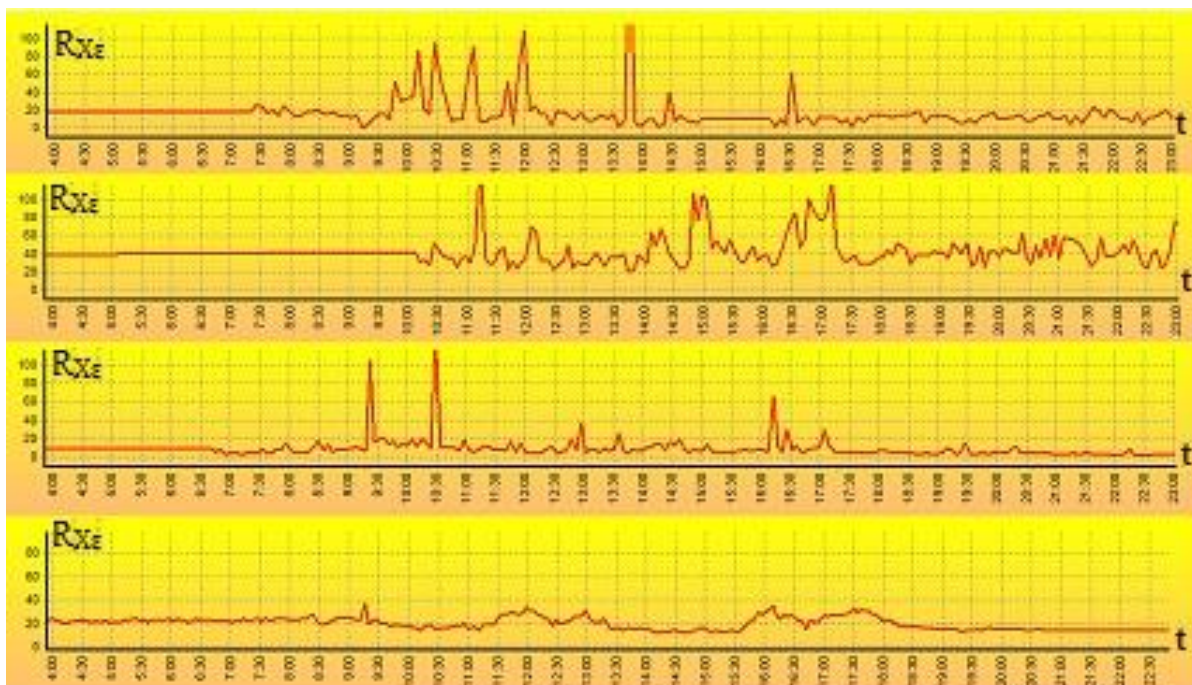


Рис. 7. III зона – Siyezen, Neftchala, Qum Adasu, Turkmen01 2014-01-09 Каспийское море, шельф Азербайджана

На рис. 10 приводится результат выявления IV зоны землетрясения, которое произошло в Азербайджане. Как видно из графиков на рис. 10, станциями соответствующий ASP регистрированы в следующем последовательности: Qum Adasy-17:45, Shirvan-12:45, Qazax-19:00 и Naxchvan-18:30, что дало возможность системе определить номер зоны (IV) ожидаемого землетрясения системой с опережением времени регистрации землетрясения на 19 часов.

На рис. 11 приведен результат выявления I зоны землетрясения, которое произошло на шельфе Туркмени-

стана. Как это видно из графиков на рис. 11, данное событие зафиксировано станциями Neftchala-06:45, Qum Adasy-07:55, Siyezen-08:15, Kibernetik-09:55, Shirvan-10:20.

На рис. 12 приведена информация выявления зоны ожидаемого землетрясения, которое произошло на I зоне в Азербайджане. Как это видно из рис. 12, при этом имело место следующая последовательность комбинации начала индикаций аномалий станциями Siyezen-00:50, Qum Adasy-02:15, Shirvan-07:20, Qazax-07:30, что позволило системе выявить местонахождение зоны ожидаемого землетрясения (Азербайджан).

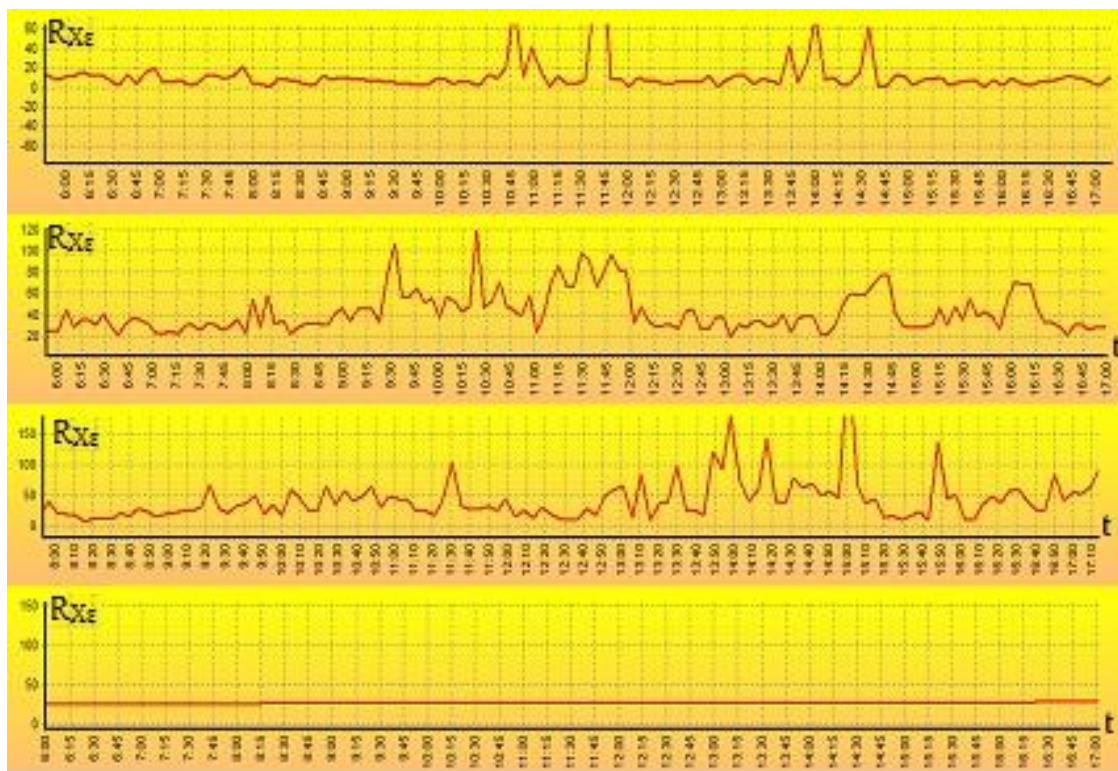


Рис. 8. I – Siyezen, Neftchala, Qum Adasy, Turkmen01 2014-01-13 Туркменистан

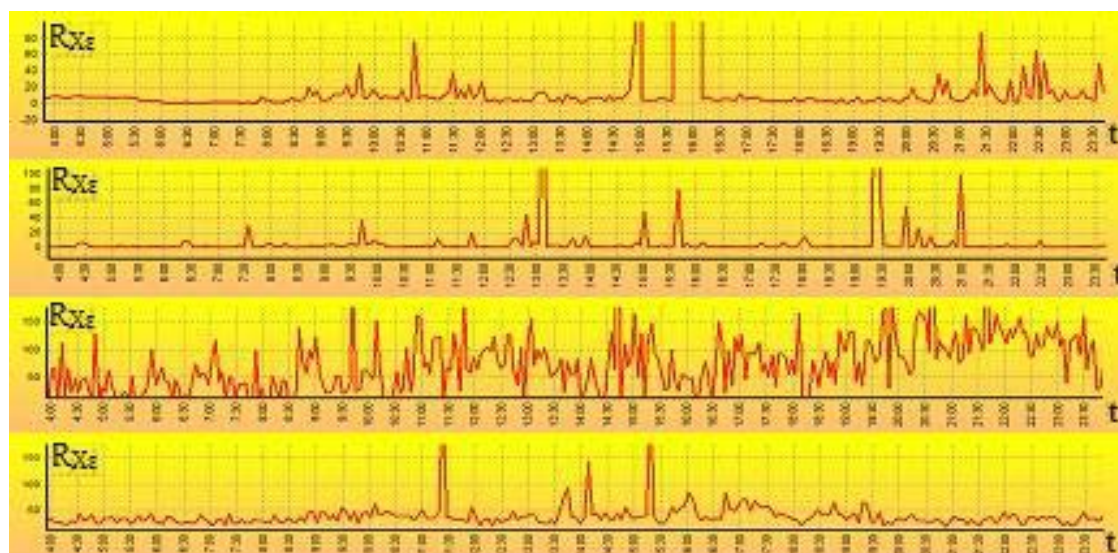


Рис. 9. IX – Qum Adasy, Shirvan, Naxchvan, Neftchala 2014-01-28 23:47:38.0 UTC ML 5.1 Западный Иран

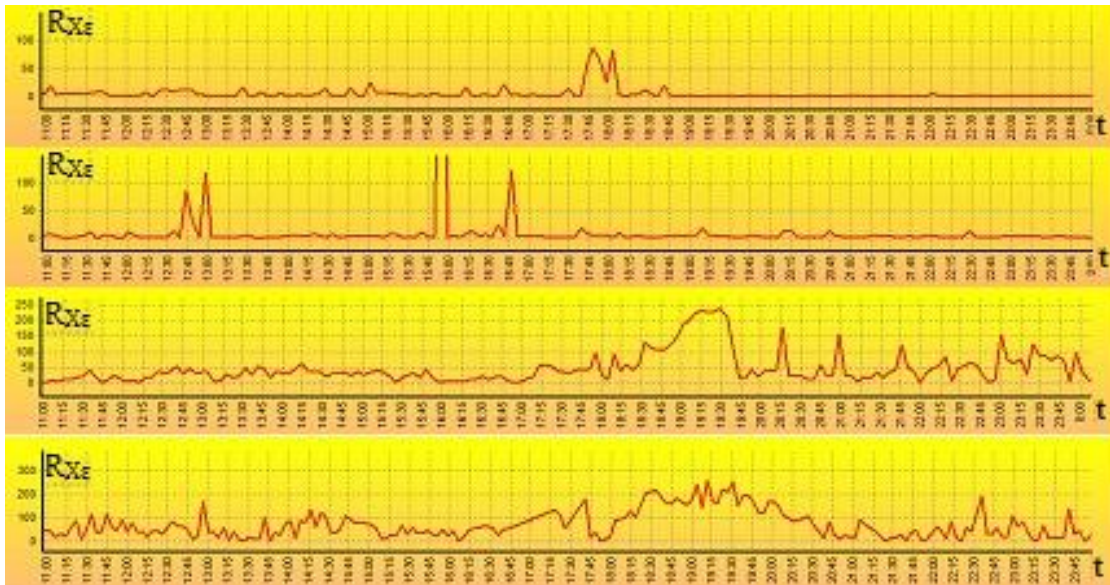


Рис. 10. IV – Qum Adasy, Shirvan, Qazax, Naxchvan 2014-02-09
2014-02-10 12:06:48.0 UTC Mw 5.4 Азербайджан

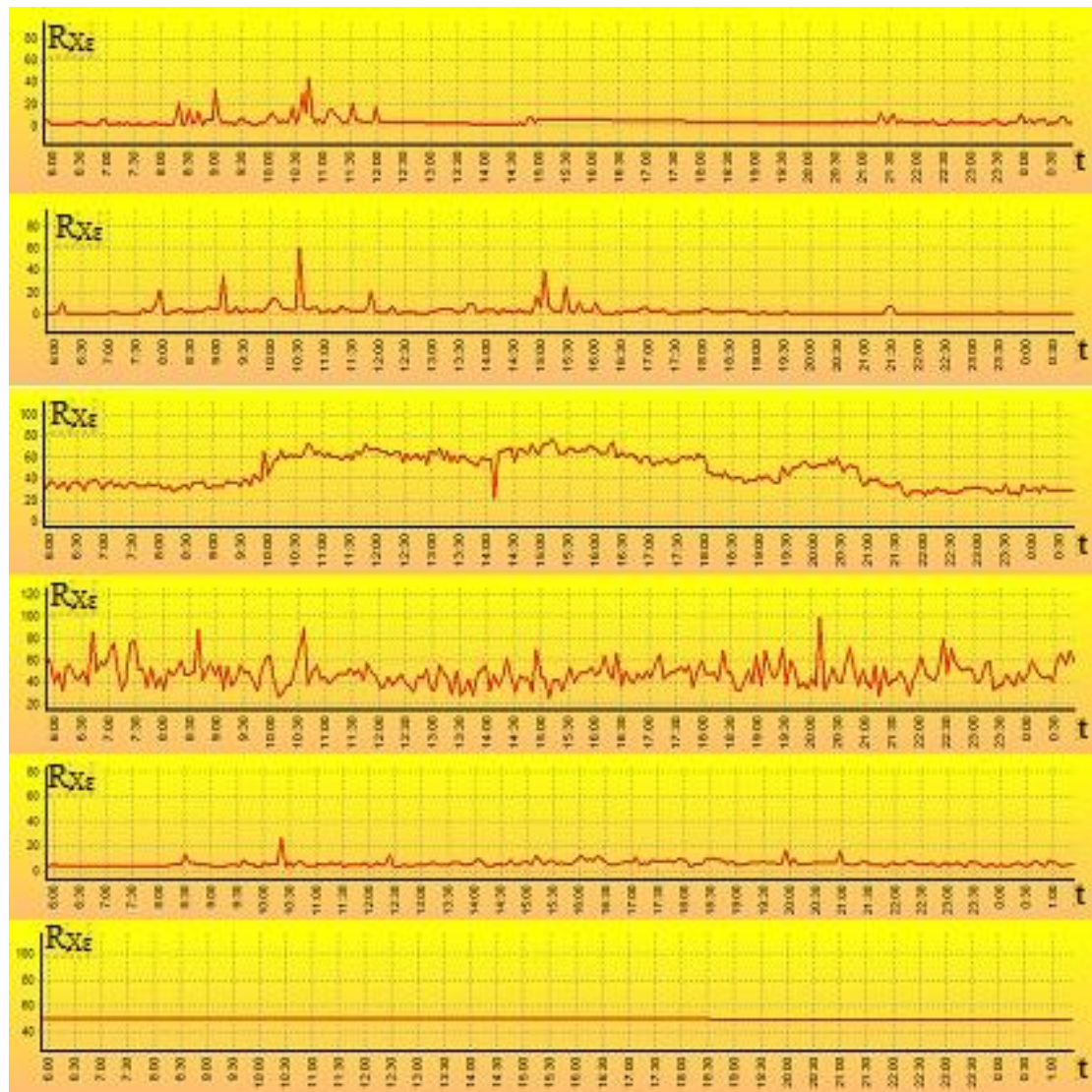


Рис. 11. I – Siyezen, Qum Adasy, Kibernetik, Neftchala, Shirvan, Turkmen01 2014-06-06
2014-06-07 06:05:32.1 UTC mb 5.6 Каспийское море шельф Туркменистана

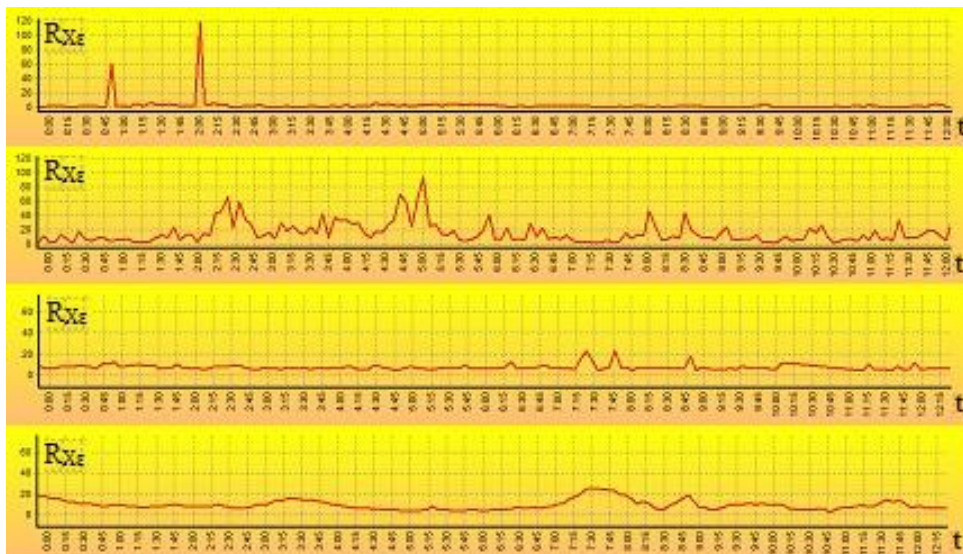


Рис. 12. I – Siyezen, Qum Adasy, Shirvan, Qazax 2014-06-29
2014-06-29 17:26:10.4 UTC mb 5.1 Азербайджан

10. Выводы

В работе рассматривается возможность минимизации ущерба от сильных землетрясений путем взаимосвязанного решения проблемы контроля микроизменения ССО во время частых малоэнергетических землетрясений и мониторинга скрытого периода зарождения АСП. Ниже приводятся основные результаты, которые предложены для решения этой проблемы.

1. Для минимизации ущерба от землетрясений предложена система, позволяющая совмещать мониторинг скрытого периода нарушения сейсмостойкости объектов с мониторингом зарождения АСП. Учитывая специфику формирования сейсмоакустических шумов в системе, помеха используется как носитель диагностической информации. Благодаря этому появилась возможность взаимосвязанного решения задачи мониторинга сейсмостойкости объектов и АСП.

2. Предложенная распределенная система при помощи ЛУПС-ов позволяет осуществить непрерывный мониторинг микроизменений сейсмостойкости социально-значимых строительных объектов. При этом оценка исходного состояния их сейсмостойкости определяется косвенно. Для этого на сервере системы сейсмостойкость нескольких фундаментальных объектов принимается как эталонная, и для них формируются соответствующие множества и матрицы. В процессе непрерывного мониторинга сейсмостойкости объектов они сравниваются с эталонными. Если их отличие превосходит некоторый пороговый уровень, тогда они относятся к группе, требующей мониторинга при помощи мобильной аппаратуры диагностики.

3. По результатам, полученным от экспериментальных данных, можно предположить, что время опережения регистрации зарождения АСП сейсмоакустической станцией по сравнению со стандартной сейсмоаппаратурой обусловлено двумя факторами. Во-первых, сейсмоакустические волны, возникающие в начале зарождения АСП, из-за частотных характеристик некоторых верхних пластов не доходят до поверхности земли. Это способствует их распространению в глубинных пластах в горизонтальном направлении в

виде шума. При этом, когда они достигают стальных труб скважины на глубине более 3–6 км, сейсмоакустические волны преобразовываются в акустические сигналы и передаются со скоростью звука на поверхность земли, где улавливаются при помощи гидрофона. В то же время низкочастотные сейсмические волны от сейсмопроцессов ощущаются на поверхности земли через определенный промежуток времени, когда уже происходит землетрясение. Поэтому они регистрируются сейсмоприемниками стандартной наземной аппаратуры заметно позже. Во-вторых, применение робастной помехотехнологии позволяет анализировать шумы, полученные от акустических датчиков и фиксировать АСП в начале их зарождения. В результате, благодаря этим двум факторам появляется возможность на основе полученной сейсмоакустической информации опередить время индикации начала предстоящего землетрясения в отличие от станций сейсмослужбы.

4. Сейсмоакустические станции мониторинга АСП также могут быть использованы для мониторинга скрытого периода процесса формирования вулканов значительно раньше их извержения.

5. Функционирование предложенной системы позволит получить информацию о предстоящем землетрясении за 10 и более часов до его начала, а также о техническом состоянии и сейсмостойкости социально-значимых строительных объектов. В результате принятия своевременных решений об эвакуации населения из наиболее уязвимых зданий, отключении подачи электро-, газо-, водо- снабжений, уменьшения уровня воды в водохранилищах гидроэлектростанций, остановки химических и др. опасных производств, поездов метро и железных дорог возможна минимизация ущерба и экологических последствий от катастрофических землетрясений.

6. Учитывая, что стоимость скважины с увеличением глубины резко возрастает, рекомендуется создание сети станций, осуществить на станциях, построенных на водяных скважинах с глубиной 50–100 метров. При этом гидрофоны рекомендуется погружать на водяной столб глубиной 10–20 метров. Для повышения достоверности и надежности результата выявления зоны

ожидаемого землетрясения целесообразно построить сеть из большого количества станций (более 10–15), на скважинах с одинаковой глубиной, расположенных на равных расстояниях. Путем интеграции сетей станций RNM АСП стран нескольких соседних сейсмоактивных регионов по спутниковой связи в перспективе можно повысить степень достоверности и надежность определения координаты зоны ожидаемого землетрясения.

7. Эксперименты показали, что с увеличением мощности землетрясения повышается степень достоверности результатов выявления зоны ожидаемого землетрясения. При мощности более 5 баллов практически во всех случаях результат выявления ожидаемого землетрясения можно считать достоверным.

8. Эксперименты на станции «Гум Адасы» на Каспийском море показали, что радиус мониторинга в этой станции значительно шире, чем на станциях, которые расположены далеко от Каспийского моря. Другие станции в Сиязане и в Нефтчале, расположенные вблизи Каспийского моря также имеют относительно других станций больший радиус мониторинга. Практически все сейсмические процессы, которые достигают Каспийского моря, четко регистрируются этими станциями. Следовательно, при создании сетей новых станций надо принимать во внимание, что море является «идеальным проводником» сейсмоакустических шумов, возникающих при зарождении АСП в регионе.

Литература

1. Коллакот, Р. Диагностика повреждений [Текст] / Р. Коллакот. – М: Мир, 1989. – 516 с.
2. Aliev, T. Digital noise monitoring of defect origin [Text] / T. Aliev. – London, Springer, 2007. – 223 p.
3. Aliev, T. A. Robust Technology with Analysis of Interference in Signal Processing [Text] / T. A. Aliev. – New York, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003. – 199 p.
4. Aliev, T. A. Noise monitoring technology for objects in transition to the emergency state [Text] / T. A. Aliev, G. A. Guluyev, F. H. Pashayev, A. B. Sadygov // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2012. – Vol. 27. – P. 755–762. doi: 10.1016/j.ymsp.2011.09.005
5. Method for monitoring the beginning of anomalous seismic process [Text] / Aliev, T. A., Alizada T. A., Abbasov, A. A. – International Application No PCT/AZ2005/000006, Pub.No WO2006/130933, International Filing Date – December 19, 2005.
6. Method for monitoring and forecasting earthquakes [Text] / Aliev, T. A., Abbasov, A. A., Aliev, E. R., Guluyev, G. A. – International Application No PCT/AZ2006/00000, Pub.No WO2007/143799, International Filing Date – June 16, 2006.
7. Aliev, T. A. Method for monitoring and forecasting earthquakes [Text] / Aliev, T. A., Abbasov, A. M., Aliev, E. R., Guluyev, G. A. – Eurapian Asian patent No 011003. International Application No PCT/AZ2006/00000, Pub.No WO2007/143799, International Filing Date – June 16, 2006.
8. Aliev, T. A. Digital technology and systems for generating and analyzing information from deep strata of the Earth for the purpose of interference monitoring of the technical state of major structures [Text] / T. A. Aliev, A. M. Abbasov, E. R. Aliev, G. A. Guluyev // Automatic Control and Computer Sciences. – 2007. – Vol. 41, Issue 2. – P. 59–67. doi: 10.3103/s0146411607020010
9. Aliev, T. A. Intelligent seismoacoustic system for monitoring the beginning of anomalous seismic process [Text] / T. A. Aliev, A. M. Alizada, G. D. Yetirmishli, G. A. Guluyev, F. G. Pashayev, A. G. Rzayev // Seismic Instruments. – 2011. – Vol. 47, Issue 1. – P. 27–41. doi: 10.3103/s0747923911010026
10. Aliev, T. A. Digital Technology and the system of interference monitoring of the technical state of contractive objects, and the system of the signaling of abnormal seismic processes [Text] / T. A. Aliev, A. M. Abbasov // Automatic Control and Computer Sciences. – 2005. – Vol. 6. – P. 3–10.
11. Aliev, T. A. Digital technology and the system of interference monitoring of the technical state of constructive objects, and the system of the signalling of abnormal seismic processes [Text] / T. A. Aliev, A. M. Abbasov // Automatic Control and Computer Sciences. – 2005. – Vol. 39, Issue 6. – P. 1–7.
12. Aliev, T. A. Position-binary and spectral indicators of microchanges in the technical states of control objects [Text] / T. A. Aliev, A. M. Abbasov, G. A. Guluyev, A. H. Rzayev, F. H. Pashayev // Automatic Control and Computer Sciences. – 2009. – Vol. 43, Issue 3. – P. 156–165. doi: 10.3103/s0146411609030067
13. Aliev, T. A. Noise monitoring technology for objects in transition to the emergency state [Text] / T. A. Aliev, G. A. Guluyev, F. H. Pashayev, A. B. Sadygov // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2012. – Vol. 27. – P. 755–762. doi: 10.1016/j.ymsp.2011.09.005
14. Ozbulut, O. E. Re-centering variable friction device for vibration control of structures subjected to near-field earthquakes [Text] / O. E. Ozbulut, S. Hurlbaeus // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2011. – Vol. 25, Issue 8. – P. 2849–2862. doi: 10.1016/j.ymsp.2011.04.017
15. Lei, Y. Structural damage detection with limited input and output measurement signals [Text] / Y. Lei, Y. Jiang, Z. Xu // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2012. – Vol. 28. – P. 229–243. doi: 10.1016/j.ymsp.2011.07.026
16. Moon, B. Statistical random response analysis and reliability design of structure system with non-linearity [Text] / B. Moon, C.-T. Lee, B.-S. Kang, B. S. Kim // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2005. – Vol. 19, Issue 5. – P. 1135–1151. doi: 10.1016/j.ymsp.2004.05.003
17. Aliev, T. A. Robust technologies for calculating normalized correlation functions [Text] / T. A. Aliev, N. F. Musaeva, U. E. Sattarova // Cybernetics and Systems Analysis. – 2010. – Vol. 46, Issue 1. – P. 153–166. doi: 10.1007/s10559-010-9194-1
18. Aliev, T. A. Technology of calculating robust normalized correlation matrices [Text] / T. A. Aliev, N. F. Musaeva // Cybernetics and System Analysis. – 2011. – Vol. 47, Issue 1. – P. 152–165. doi: 10.1007/s10559-011-9298-2