УДК 621.391

А. М. Пашаев[1], д-р физ.-мат. наук, ректор, info@naa.baku.az,
А. А. Ализаде[2], д-р геол.-минер. наук, акад. НАНА, директор, president@science.az,
Т. А. Алиев[3], д-р техн. наук, акад. НАНА, директор, telmancyber@rambler.ru,
А. М. Аббасов[4], д-р техн. наук, акад. НАНА, министр, ali@elm.az,
Г. А. Гулуев[3], PhD, зав. лаб., scb_06@mail.ru,
Ф. Г. Пашаев[3], PhD, вед. науч. сотр., pasha.farhad@gmail.com,
У. Э. Саттарова[3], PhD, ст. науч. сотр., ulker.rzaeva@gmail.com,
[1] Национальная авиационная академия Азербайджана,
[2] Институт геологии Национальной академии наук Азербайджана,
[3] Институт систем управления Академии наук Азербайджана,
[4] Министерство связи и информационных технологий Азербайджана

Интеллектуальная сейсмоакустическая система выявления зоны очага ожидаемого землетрясения

Проанализированы результаты Noise-технологии мониторинга аномальных сейсмических процессов, проводимых с июля 2010 г. по июнь 2014 г. на девяти сейсмоакустических станциях, построенных на устьи скважин глубиной 10, 200, 300, 1400...5000 м. По результатам экспериментальных данных, полученных в течение более трех лет, создана интеллектуальная система, позволяющая по комбинациям времени изменения оценки взаимнокорреляционной функции между полезным сигналом и помехой сейсмоакустической информации, полученной от различных станций за 10...20 ч до землетрясения, выявить местонахождение его зоны. Система в перспективе может быть использована сейсмологами как инструментарий при определении местонахождения зоны ожидаемого землетрясения.

Ключевые слова: *сейсмический мониторинг, аномальные сейсмические процессы, интеллектуальная сейсмоакустическая система, робастная Noise-технология, обработка сейсмоакустической информации, экспертная система, нейросетевой прогноз зон землетрясения*

Введение

В последние годы интенсивно ведутся работы по изучению причин и природы землетрясений [1—3]. Продолжается также изучение возможности получения всевозможной сейсмической информации из глубинных пластов земли [3—7]. К анализу сейсмосигналов, получаемых при землетрясениях, применяются такие методы, как вейвлет-преобразование и методы конечных элементов [4, 8—11]. Во всех этих исследованиях проблемы, связанные с прогнозированием землетрясений, остаются основным направлением научно-исследовательских работ [12—24]. Созданы и создаются различные модели и технологии [25—28], разработаны и внедрены многочисленные системы раннего предупреждения населения, модели и технологии быстрого реагирования спасательных сил соответствующих структур [25—28]. Несмотря на вышеупомянутые научно-технические работы в настоящее время землетрясения своевременно не прогнозируются, что приводит к многочисленным катастрофическим последствиям [28—38].

В работах [39—41] предлагается сейсмоакустическая система мониторинга начала процесса подготовки землетрясении. Система состоит из сети девяти сейсмоакустических станций робастного Noise-мониторинга аномальных сейсмических процессов (RNM АСП). В результате экспериментов, проводимых на этих станциях с июля 2010 г., установлено, что при зарождении АСП возникает взаимная корреляционная связь между полезным сигналом и помехой сейсмоакустической информации.

Результат эксплуатации этих станций показал, что каждая из них в отдельности по изменению оценки взаимной корреляционной функции между полезным сигналом и помехой надежно осуществляет индикацию процессов зарождения АСП, предшествующих землетрясению. Однако определение координат ожидаемого землетрясения с достаточной точностью с применением этих станций невозможно. Экспериментальные исследования показали, что имеется возможность создания интеллектуальной системы, которая позволит с помощью этих станций выявить местоположение зоны АСП. Ниже рассматривается один из возможных вариантов создания такой системы.

Постановка задачи

Известно, что в сейсмических регионах, как правило, после определенного промежутка времени T_0 нормального сейсмического состояния в результате зарождения аномальных сейсмических процессов по истечении определенного промежутка времени T_1 происходит землетрясение. Несмотря на различия длительностей времени T_0, T_1, задача мониторинга начала времени зарождения АСП сводится к обеспечению надежной индикации начала периода T_1. Этот вопрос подробно рассмотрен в работах [39—41].

В работе [39] была поставлена задача создания технологии и системы, позволяющей фиксировать момент начала периода времени T_1. Однако проведенные экспериментальные исследования [39—44] показали, что начало периода T_1 происходит не только при зарождении АСП. Поэтому для мониторинга начала процесса зарождения АСП, кроме регистрации начала периода T_1, также необходимо осуществить индикацию изменения оценки взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$.

Поэтому в предлагаемой работе ставится задача применения оценки $R_{X\varepsilon}(\mu)$ сейсмоакустического сигнала $g(i\Delta t)$ как информативного признака для индикации начала зарождения АСП. Для этого в процессе мониторинга необходимо вычислить оценку $R_{X\varepsilon}(\mu)$.

Кроме того, для практического применения сети станций RNM АСП необходимо создание технологии определения местонахождения зоны АСП. Для решения этой задачи сначала рассмотрим возможность применения существующих методик вычисления эпицентра землетрясений [19—28, 46—48] на основе сейсмоинформации, полученной с помощью сети стандартных наземных сейсмостанций.

Известно [19—28, 46—48], что в этих случаях для определения эпицентра землетрясений используют разницу времен достижения основными сейсмическими волнами P (первичными) и S (вторичными) наземных сейсмических станций. Скорость распространения волн P выше, чем скорость распространения S волн. В гомогенной изотропной среде скорость волн P определяется выражением

$$v_P = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}, \qquad (1)$$

где k — объемный коэффициент; μ — модуль сдвига; ρ — плотность материала, через который проходят волны.

Скорость распространения волн S можно определить по формуле

$$v_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \qquad (2)$$

где μ — модуль сдвига; ρ — плотность материала, через который проходят волны. Расстояние от обычной наземной сейсмической станции до эпицентра находится умножением разности времени на разность скоростей:

$$S = \Delta T(v_p - v_s). \qquad (3)$$

После определения расстояния между эпицентром и различными сейсмостанциями координаты эпицентра определяются геометрическим способом. Однако, к сожалению, во всех известных случаях в системах сейсмического мониторинга координаты эпицентров и гипоцентров определяются только после землетрясений [19—28].

Экспериментальные исследования показали, что в силу многих причин по полученным результатам на станциях RNM АСП вычисления координаты зоны АСП с применением указанной технологии практически невозможно.

В настоящей работе ставится задача создания интеллектуальной системы как для мониторинга зарождения АСП и выявления местонахождения зоны, так и для определения ориентировочного значения магнитуды ожидаемого землетрясения.

Технология определения информативных признаков скрытого периода зарождения АСП

Проведенные исследования показали, что при зарождении АСП в момент начала периода T_1 меняются оценки взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$, дисперсии помехи D_ε и значения помехокорреляции $R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0)$ [39—41]. Это связано с тем, что в начале периода T_1 помеха $\varepsilon(i\Delta t)$ формируется от влияния происходящих АСП. Поэтому в течение времени T_1 между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ возникает корреляция, и оценка $R_{X\varepsilon}(\mu)$ резко увеличивается. По этой причине можно считать, что оценка $R_{X\varepsilon}(\mu)$ является основным информативным признаком, который целесообразно использовать при мониторинге скрытого периода зарождения АСП.

Начиная с 1 июля 2010 г. для регистрации начала скрытого периода зарождения АСП на станциях RNM АСП были применены как традиционные технологии, так и робастные Noise-технологии. При этом с использованием традиционных корреляционных и спектральных технологий не удалось осуществить регистрацию времени T_1 с достаточной достоверностью и надежностью. В то же время при применении робастной Noise-технологии оценки взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu)$, помехокорреляции $R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu)$ и дисперсии помехи D_ε с началом времени T_1 резко менялись. Это оказалось решающим фактором, позволяющим безошибочно и с достаточной степенью надежности осуществить мониторинг начала зарождения АСП. Поэтому при создании сети станций RNM АСП именно оценки $R_{X\varepsilon}(\mu)$, $R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu)$ и D_ε были выбраны в качестве информативных признаков для решения задачи мониторинга начала возникновения АСП.

В работе [39] предложено выражение для вычисления оценки релейной взаимно корреляционной функции $R^*_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и его помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ в следующем виде:

$$R^*_{X\varepsilon}(\mu = 0) \approx \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[\mathrm{sgn}\,g(i\Delta t)g(i\Delta t) -$$

$$- 2\mathrm{sgn}\,g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) + \mathrm{sgn}\,g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t)], \quad (4)$$

где g — сейсмоакустический сигнал.

Также показано, что, располагая оценками $R^*_{X\varepsilon}(\mu = 0)$, $R^*_{gg}(\mu = 1)$, $R_{gg}(\mu = 1)$ и используя равенство между соотношениями $R^*_{gg}(\mu = 1)/R_{gg}(\mu = 1)$ и $R^*_{X\varepsilon}(\mu = 0)/R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$:

$$\frac{R^*_{gg}(\mu = 1)}{R_{gg}(\mu = 1)} = \frac{R^*_{X\varepsilon}(\mu = 0)}{R_{X\varepsilon}(\mu = 0)}, \quad (5)$$

по формуле

$$R_{X\varepsilon}(\mu = 0) = \frac{R_{gg}(\mu = 1)R^*_{X\varepsilon}(\mu = 0)}{R^*_{gg}(\mu = 1)} \quad (6)$$

можно определить оценку $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$.

Эксперименты показали, что для повышения надежности и достоверности результатов мониторинга целесообразно в качестве дополнительных информативных признаков также использовать оценки помехокорреляции $R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0)$ и дисперсии помехи D_ε, которые определяются по следующим выражениям [39—48]:

$$R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu) = R_{X\varepsilon}(\mu) + D_\varepsilon = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[g^2(i\Delta t) +$$

$$+ g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t) - 2g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t], \quad (7)$$

$$D_\varepsilon = R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0) - R_{X\varepsilon}(\mu = 0). \quad (8)$$

Таким образом, по формулам (4), (6)—(8) имеется возможность определения оценок $R^*_{X\varepsilon}(\mu = 0)$, $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$, $R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0)$ и D_ε, с помощью которых можно осуществить мониторинг АСП с достаточной надежностью.

Интеллектуальная технология и система выявления местонахождения зоны зарождения АСП

Известно, что когда АСП достигает критического состояния, происходит землетрясение. Границы зоны и магнитуды землетрясения зависят от структуры и характера напряженно-деформированного состояния горных пород в данном конкретном месте. Деформация, происходящая скачкообразно, вызывает появление упругих волн. Объем деформируемых пород играет важную роль, определяя силу сейсмического толчка и формирование сейсмоакустического шума $g(i\Delta t)$. Каждому основному разрыву предшествует довольно длительное время T_1 подготовки землетрясения. Это время может продолжаться до нескольких десятков часов [39].

Анализ сейсмоакустической информации, полученной с помощью акустических датчиков, установленных на устьи законсервированных нефтяных скважин, показал, что при зарождении АСП распространение сейсмоакустического шума в глубинных пластах Земли на несколько десятков часов T_1 опережает ожидаемые землетрясения [39—41]. Экспериментально установлено, что мониторинг начала времени T_1 с применением технологии, описанной выше, достаточно надежно осуществляется станциями RNM АСП (рис. 1, см. вторую сторону обложки, и рис. 2) [39, 40]. Далее рассматривается возможность создания интеллектуальной технологии определения местонахождения зоны АСП с помощью информации, полученной от станций, построенных в девяти прикаспийских сейсмоактивных регионах, характеристики которых (географические координаты и глубины скважины) представлены в табл. 1.

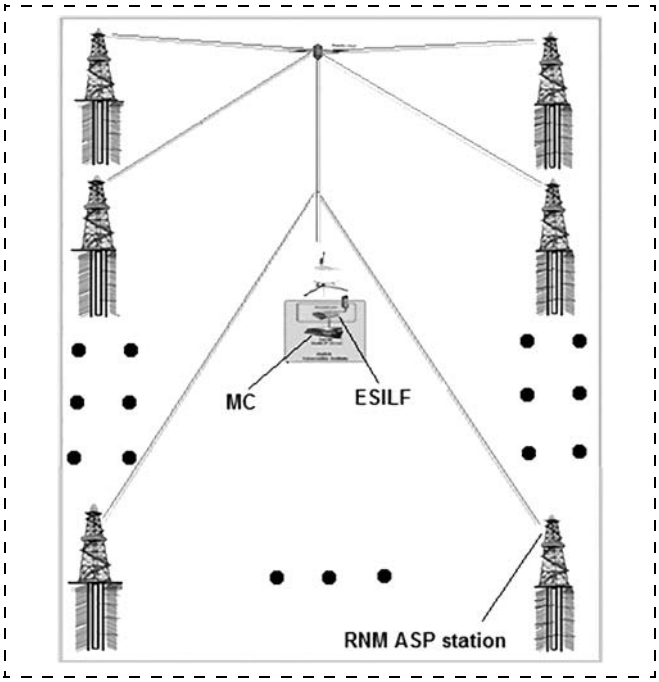

Рис. 2. Интеллектуальная сейсмоакустическая система выявления местонахождения зоны ожидаемого землетрясения

Таблица 1

Характеристики станций RNM АСР

№ пп	Название станции	Координаты станции		Глубина скважины	Начало работы станции
		Широта	Долгота		
1	Гум Адасы	40.310425°	50.008392°	3500 м	Июль 2010
2	Сиазань	41.046217°	49.172058°	3145 м	Ноябрь 2011
3	Нафталан	40.609521°	46.791458°	4000 м	Май 2012
4	Ширван	39.933170°	48.920745°	4900 м	Ноябрь 2011
5	Нефтчала	39.358333°	49.246667°	1430 м	Июнь 2012
6	Нахичеван	39.718000°	44.876000°	1800 м	Март 2013
7	Газах	41.311889°	45.100278°	200 м	Август 2013
8	Туркмен01	38.530089°	56.654472°	300 м	Август 2013
9	Кибернетик (Баку)	40.375700°	49.810833°	10 м	Февраль 2014

Эксперименты, проводимые на станциях RNM АСП, показали, что сейсмоакустические шумы, которые принимаются из глубин Земли гидрофонами, установленными на устьи скважин, являются прямыми и непосредственными предвестниками процесса подготовки землетрясений.

Результаты измерения и анализа этих шумов на каждой станции по спутниковой связи передаются на сервер центра сейсмоакустического мониторинга (ЦМ). В системе также предусмотрена возможность передачи полученных результатов на сервер ЦМ других соседних стран сейсмоактивных регионов.

Начиная с июля 2010 г. для проведения широкомасштабных экспериментов по мониторингу АСП, как это показано на рис. 1, поочередно были введены в эксплуатацию станции RNM АСП Гум Адасы (Каспийское море), Ширван, Сиазань, Нафталан, Нефчала, Нахичевань (на границах Ирана и Турции), Туркмен01 (Туркменистан), Газах (на границе Грузии), Кибернетик (Баку). Последние три станции построены на водяных скважинах глубиной 300, 200 и 10 м соответственно. Станции строятся на тех скважинах, где трубы самотеком заполняются водой. Гидрофоны опускаются на глубину 10...20 м от уровня водяного столба. Анализ сейсмоакустических сигналов, полученных этими станциями, показал, что при зарождении АСП возникают сейсмоакустические шумы, которые распространяются в радиусе более 300...500 км на несколько десятков часов раньше, чем сейсмические волны, которые регистрируются наземными сейсмостанциями.

В процессе функционирования сети станций RNM АСП проводится синхронный робастный Noise-анализ сейсмоакустических сигналов, получаемых от всех станций по спутниковой связи (рис. 2). При этом через каждые 5 с в сервер центра мониторинга от станций передаются оценки Noise-характеристик $R_{X\varepsilon}(\mu)$, $R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu)$, D_ε. По их изменениям, например, для i-й и j-й станции осуществляется индикация начала времени зарождения АСП T_{1i}, T_{1j}.

Результат эксплуатации этих станций показал, что каждая из них в отдельности дает возможность надежно осуществить индикацию процесса зарождения АСП, предшествующих землетрясению [39]. Кроме того, полученные результаты с помощью сети станций RNM АСП открывают возможность создания интеллектуальной технологии выявления местонахождения зоны ожидаемого землетрясения. Для этого сначала с помощью сети этих станций определяются комбинации времени индикации T_{1i}, T_{1j}, которые в сочетании с координатами расположения станций представляют собой исходные данные для решения задачи определения местонахождения зоны АСП. При этом для повышения степени достоверности и надежности полученных результатов, кроме комбинации времени индикации, в качестве исходных данных также целесообразно использовать разности времени $T_{1i} - T_{1j}$ для каждой выбранной пары станций. Другими словами, для решения рассматриваемой задачи в качестве исходных данных, кроме комбинации T_{1i}, T_{1j}, также целесообразно определять разность времени индикации АСП между станциями, т. е. разности $\Delta\tau_{ij} = T_{1i} - T_{1j}$.

Эксперименты показали, что по значениям оценок Noise-характеристик трудно определить начало времени индикации T_{1i} с достаточной точностью. Поэтому, учитывая важность и необходимость повышения точности его определения, в предлагаемой системе предусмотрено дублирование процесса определения разности времени $\Delta\tau_{ij} = T_{1i} - T_{1j}$. Для этого целесообразно последнюю дополнительно определять по экстремальному значению оценки взаимно корреляционной функции $R_{g_i g_j}(\mu_{\max})$ между сигналами $g_i(i\Delta t)$ и $g_j(i\Delta t)$, получаемыми от различных комбинаций станций RNM АСП по следующим выражениям:

$$R_{g_i g_j}(\mu_{\max}) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} g_i(i\Delta t)g_j(i+\mu)\Delta t, \qquad (9)$$

$$R_{g_i g_j}(\mu_{\max}) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} g_i^2(i\Delta t)g_j^2(i+\mu)\Delta t, \qquad (10)$$

$$R^*_{g_i g_j}(\mu_{\max}) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} g_i(i\Delta t)g_j^2(i\Delta t). \qquad (11)$$

При этом процедура определения разности времени мониторинга между различными станциями в сервере ЦМ заключается в следующем:

1) сначала определяется время регистрации начала времени T_{1i} зарождения АСП на первой станции Гум Адасы;

2) затем определяются времена мониторинга для второй (Ширван), третьей (Сиязань), четвертой (Нафталан) и т. д. станций;

3) далее, по выражениям (9)—(11) определяется множество оценок взаимно корреляционных функций $R_{g_i g_j}(i\Delta t)$, $R^*_{g_i g_j}(i\Delta t)$, из которых выбираются те временные сдвиги $\mu\Delta t$, на которых кривая взаимно корреляционной функции имеет пиковое (экстремальное) значение. По ним определяются разности времени регистрации АСП 1-й и j-й станцией $\Delta\tau_{ij} = T_{1i} - T_{1j}$;

4) найденные временные разности $\Delta\tau_{ij}$ используются как исходные данные при определении зоны местоположения АСП.

Таким образом, в предлагаемой системе оценки Noise-характеристик $R_{X\varepsilon}(\mu)$, $R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu)$ и D_ε, получаемых в результате мониторинга АСП станциями RNM АСП Гум Адасы, Ширван, Сиазань, Нафталан, Нефтчала и Нахичевань, Туркмен01 (Туркменистан), Газах и Кибернетик (г. Баку), через спутниковую связь синхронно передаются на сервер ЦМ. По полученным результатам мониторинга формируются как комбинации последовательности времен индикации T_{1i}, T_{1j}, так и комбинации разности времен $\Delta\tau_{ij}$, которые используются как исходные данные для определения местонахождения ожидаемого землетрясения.

Эксперименты, проводимые в июне—июле 2010 г. на указанных станциях, показали, что в Азербайджане и близлежащих регионах в радиусе 300...500 км вокруг сети станций RNM АСП имеются следующие активные зоны землетрясений:

1) Туркменская сторона Каспийского моря;
2) в Каспийском море южнее Апшеронского полуострова;
3) в Каспийском море севернее Апшеронского полуострова;
4) в Ширванской зоне Азербайджана;
5) в северо-западной зоне Азербайджана;
6) в Южной зоне Азербайджана;
7) на юге Кавказского региона Российской Федерации;
8) на северо-востоке Ирана;
9) в северо-западном регионе Ирана (в окрестностях Тебриза);
10) на границе Ирана, Ирака и Турции;
11) северный регион Ирана;
12) восточный регион Турции;
13) западная зона Грузии (Черное море).

Некоторые результаты регистрации АСП в этих зонах станциями RNM АСП приведены в работе [39].

В этих зонах в последние полтора—два года произошли многочисленные землетрясения магнитудой более 3...4 баллов. При этом для каждой зоны комбинации последовательности времени регистрации АСП станциями Гум Адасы, Ширван, Сиязань, Нефтчала, Нафталан и Нахичевань практически повторялись. Проведенный анализ записи графиков показал, что каждая комбинация последовательности времени индикации текущих АСП соответствует одному из конкретных очагов землетрясений. Сотрудники, занимающиеся вопросом интерпретации результатов проводимых экспериментов более двух лет, по этим комбинациям времени научились интуитивно, практически безошибочно выявлять местонахождения зоны ожидаемого землетрясения. При этом стала очевидной целесообразность выявления местонахождения зоны ожидаемого землетрясения с помощью экспертных систем. Так естественным образом возникла проблема создания соответствующей экспертной системы, которая позволила бы сейсмологам использовать сеть станций RNM АСП как эффективный инструментарий при определении местонахождения зоны ожидаемого землетрясения. Основу предложенного в данной работе экспериментального варианта подобной экспертной системы выявления местонахождения зоны (ЭСВМЗ) АСП составляет база знаний (БЗ), которая сформирована из совокупности множеств W_1, W_2, W_3, ..., W_{13} местонахождения соответствующих очагов. Элементы каждого из этих множеств сформированы по записям графиков, где, начиная с июля 2010 г. по настоящее время, станциями RNM АСП зарегистрированы параметры всех землетрясений во всех указанных выше тринадцати очагах. Каждый элемент множества W_i, $i = 1, 2, ..., 13$, состоит из комбинации последовательности времен индикации АСП станциями T_{1i}, T_{1j}, из комбинации разности времен индикации $\Delta\tau_{ij}$, а также из комбинации оценок взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$. Кроме того, в каждый элемент БЗ также занесена магнитуда M_i, которая была определена при соответствующих землетрясениях наземными сейсмостанциями. Одновременно с этим в каждом элементе отмечена дата землетрясения. Для случая, когда в каждом множестве W_i, $i = 1, 2, ..., 13$, имеется только один элемент, БЗ имеет следующий вид:

$$W_1\left\{\begin{matrix} T_{11}^1 & T_{12}^1 & \dots & T_{19}^1 & M_1 \\ \Delta\tau_{12}^1 & \Delta\tau_{13}^1 & \dots & \Delta\tau_{19}^1 & M_1 \\ R_{1X\varepsilon}^1(\mu = 0) & R_{2X\varepsilon}^1(\mu = 0) & \dots & R_{9X\varepsilon}^1(\mu = 0) & M_1 \end{matrix}\right\};$$

$$W_2\left\{\begin{matrix} T_{11}^2 & T_{12}^2 & \dots & T_{19}^2 & M_2 \\ \Delta\tau_{12}^2 & \Delta\tau_{13}^2 & \dots & \Delta\tau_{19}^2 & M_2 \\ R_{1X\varepsilon}^2(\mu = 0) & R_{2X\varepsilon}^2(\mu = 0) & \dots & R_{9X\varepsilon}^2(\mu = 0) & M_2 \end{matrix}\right\};$$

.....

$$W_{13}\left\{\begin{matrix} T_{11}^{13} & T_{12}^{13} & \dots & T_{19}^{13} & M_{13} \\ \Delta\tau_{12}^{13} & \Delta\tau_{13}^{13} & \dots & \Delta\tau_{19}^{13} & M_{13} \\ R_{1X\varepsilon}^{13}(\mu = 0) & R_{2X\varepsilon}^{13}(\mu = 0) & \dots & R_{9X\varepsilon}^{13}(\mu = 0) & M_{13} \end{matrix}\right\}.$$

Каждое множество W_i, $i = 1, 2, ..., 13$, экспериментального варианта БЗ состоит из нескольких десятков таких элементов, и при каждом новом землетрясении они дополняются новыми элементами. В процессе эксплуатации экспертной системы (ЭС) по завершении процесса мониторинга и индикации времени начала текущего АСП станциями формируются текущие комбинации последовательности времен индикации T_{1i}, T_{1j}, комбинации разности времен индикации $\Delta\tau_{1j}$. Также формируются комбинации оценок $R_{X\varepsilon}(\mu)$.

Начиная с января 2014 г., экспериментальная фаза выявления местонахождения зоны землетрясения проводится с помощью ЭСВМЗ. Этот процесс осуществляется следующим образом. На основе результатов мониторинга на сети станций RNM АСП формируется текущий элемент. Затем на блоке идентификации экспертной системы (БИЭС) он сравнивается со всеми элементами множеств W_1, W_2, W_3, ..., W_{13}. При его совпадении с одним из элементов какого-то множества по его номеру осуществляется идентификация местонахождения зоны ожидаемого землетрясения. В блоке принятия решений (БПР) ЭСВМЗ запоминается номер зоны АСП. Одновременно с этим в это множество БЗ дополнительно вносится текущий элемент. Тем самым, в процессе эксплуатации ЭСВМЗ в БЗ все время записываются новые элементы. Таким образом, сеть станций RNM АСП в сочетании с ЭСВМЗ функционирует как единая система.

В целях проверки достоверности и надежности результатов выявления местонахождения зоны зарождения АСП было проведено испытание описанной ЭСВМЗ при всех последующих землетрясениях. Полученные результаты показали реальную возможность практического применения экспериментального варианта ЭСВМЗ для выявления местонахождения зоны АСП, что создает предпосылки для использования рассматриваемой системы как инструментария при определении местонахождения зоны ожидаемого землетрясения. Принимая во внимание такую перспективу, в перечень основных функций БПР ЭСВМЗ дополнительно была включена функция формирования и представления информации сейсмологам в следующем формате:

1. Дата текущей АСП и номер зоны ожидаемого землетрясения.

2. Результаты текущего мониторинга станциями RNM АСП.

3. Предполагаемый период опережения начала времени мониторинга АСП по сравнению с временем регистрации ожидаемого землетрясения наземными сейсмостанциями.

4. Перечень всех элементов, которые ранее были зарегистрированы в соответствующем множестве при возникновении предыдущих АСП в предполагаемом очаге местонахождения ожидаемого землетрясения (с датами).

5. Число элементов, которые совпадают с текущим.

6. Магнитуды ранее происходивших землетрясений.

7. Минимальная магнитуда ожидаемого землетрясения.

8. В случае отсутствия в БЗ элементов, совпадающих хотя бы с некоторыми элементами в множествах W_1, W_2, W_3, ..., W_{13}, на БПР формируется информация о невозможности выявления зоны землетрясения.

Технология определения приближенного значения магнитуды ожидаемого землетрясения с применением нейронной сети

Анализ результатов эксперимента по определению местонахождения зоны АСП показал, что, зная текущие оценки $R_{X\varepsilon}(\mu)$, $R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu)$, D_ε и расстояние от зоны до станций RNM АСП, с применением нейронных сетей можно определить приближенное значение минимальной магнитуды ожидаемого землетрясения. Исследования показали, что для этой цели можно использовать нейронные сети, которые приведены в работах [47, 48]. При этом оказалось, что для обучения нейронной сети целесообразно использовать информацию, содержащуюся в множествах W_1, W_2, W_3, ..., W_{13}. На рис. 3 приведена схема структуры нейронной сети ($N_3 = 1$), которая функционирует следующим образом. Из БЗ содержимые соответствующих элементов множеств W_1, W_2, W_3, ..., W_{13} поочередно передаются на входы x_1, x_2, ..., x_{N_1} нейрона, т. е. на входы нейрона поочередно поступают соответствующие комбинации времени индикации АСП T_{1ij}, разности времени индикации $\Delta\tau_{ij}$ и оценка $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$, на выходе нейрона устанавливается магнитуда M_1 землетрясения, которая была зарегистрирована наземными сейсмостанциями. Процесс обучения проводится последовательно с 1-го по 13-й очаг землетрясения. Например, при обучении нейрона применительно к третьему очагу, т. е. при землетрясении в очаге в Каспийском море, на входы нейрона из БЗ последовательно передаются полученные результаты мониторинга от станций Сиязань, Гум Адасы, Нефтчалы и Копетдаг (Туркменская), а на выходе используется значение магнитуды M_3. При обучении нейрона для определения магнитуды в 12-м очаге, т. е. в Восточной Турции, на входы нейрона передаются данные мониторинга станций Газах, Нафталан, Ширван и Нахичевань и на выходе используется магнитуда M_{12}. Таким образом, при обучении нейронной сети используются ранее зарегистрированные параметры мониторинга АСП станциями RNM АСП. Одновременно с этим по координатам местонахождения зоны землетрясения в БПР определяются приблизительные расстояния S_1 между станциями и зонами, которые также передаются во входы нейронной сети. В результате нейронная сеть по исходным данным, записанным в элементах множеств W_1, W_2, W_3, ..., W_{13}, и по расстоянию зоны АСП до каждой станции S_1, ..., S_9 обучается для определения приближенной магнитуды ожидаемого землетрясения. Благодаря этому после этапа обучения в процессе текущего мониторинга АСП с помощью сети станций RNM АСП при передаче на входы нейрона текущих комбинаций соответствующих оценок на выходе y_3 [1] сети формируется код соответствующей приближенной магнитуды M ожидаемого землетрясения. Этот результат передается на вход БПР ЭСВМЗ.

В процессе эксплуатации нейронной сети и экспертной системы каждый раз после выявления ме-

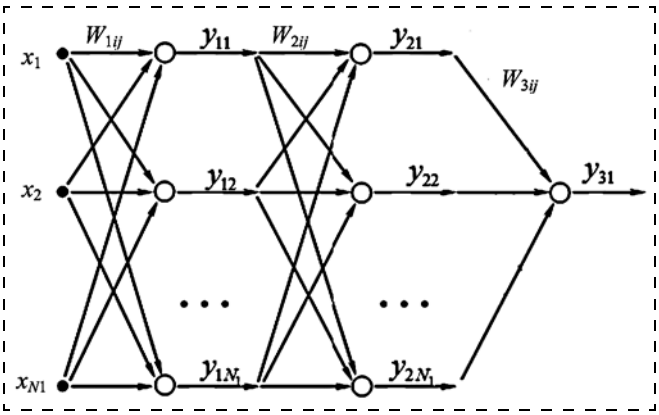

Рис. 3. Структура нейронной сети интеллектуальной сейсмоакустической системы (x_1, x_2, ..., x_{N_1} — входные значения, W_{1ij} — весовые коэффициенты для первого слоя, W_{2ij} — весовые коэффициенты для второго слоя, W_{3ij} — весовые коэффициенты для третьего слоя, y_{ij} — значений функций активизации)

стонахождения и приблизительной магнитуды каждого ожидаемого землетрясения полученный результат сравнивается с координатами и магнитудами реальных землетрясений, которые регистрируются на наземных сейсмостанциях. Полученная разность в дальнейшем используется как для коррекции БЗ, так и для обучения нейронной сети. Благодаря этому база знаний с течением времени совершенствуется, и степень обучения нейронной сети все время улучшается. В результате появляется возможность повысить надежность, достоверность и адекватность выявления как местонахождения, так и магнитуды ожидаемого землетрясения.

Анализ опыта применения экспертной системы и нейронной сети при определении местонахождения зоны ожидаемого землетрясения показал, что для повышения надежности и достоверности полученных результатов необходимо увеличение числа станций RNM АСП. Учитывая это, с начала 2013 г. была введена в эксплуатацию станция в Нахичеванской автономной области вблизи границы с Турцией и Ираном (см. рис. 1), а также станция Копетдаг в Туркменистане (см. рис. 1). Кроме того, в июле 2013 г. была построена станция в Казахском районе на границе с Грузией (см. рис. 1) и в Институте кибернетики (г. Баку). Следует отметить, что рузультаты мониторинга на станции, построенной в подвале Института кибернетики, на глубине скважины 10 метров практически совпадали с показаниями станции Гум Адасы, которая построена на скважине с глубиной 3500 м.

Результаты выявления очагов ожидаемых землетрясений интеллектуальной системой в первом полугодии 2014 г.

Опытные испытания рассматриваемой системы начаты в июне 2014 г. 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 двух—трех станциях RNM АСП также были обнаружены ошибочные результаты выявления зоны ожидаемого землетрясения. В результатах выявления местонахождения зоны ожидаемого землетрясения с мощностью более 5 баллов при нормальном состоянии функционирования всех станций RNM АСП ошибки не были обнаружены.

Перечень очагов местонахождения ожидаемых землетрясений, выявленных интеллектуальной сейсмоакустической системой по заархивированным результатам мониторинга в 2013—2014 гг., занимает много места. Поэтому в табл. 2—4 приводятся результаты 11 выявленных очагов ожидаемых землетрясений с января 2013 г. по июль 2014 г. с магнитудой, превышающей 5 баллов. В табл. 2 представлены данные результатов выявленных очагов ожидаемых землетрясений, взятые с сайта Euro-Mediterranean Seismological Centre по ссылке http://www.emsc-csem.org/#2. Здесь приведены: местонахождение, время (UTC — универсальное координированное время), координаты (широта и долгота), магнитуды (в единицах ML, mb, Mw) и глубина эпицентра землетрясений. В табл. 3 приведены значения разности времени индикации АСП между станциями RNM АСП, а в табл. 4 — значения Noise-характеристик начала процесса зарождения АСП. Знак "*" в табл. 3 означает, что данная станция RNM АСП слабо реагировала при зарождении АСП ожидаемого землетрясения, а знак "-" в табл. 4 означает, что значение регистрированной оценки $R_{X\varepsilon}(\mu)$ меньше порогового уровня.

Для иллюстрации на рис. 4 и 5 (см. вторую сторону обложки) представлены записи графиков АСП, которые предшествовали двум из указанных землетрясений (по вертикальной оси на всех рисунках отложена помехокорреляция $R_{\overline{X}\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0)$, по горизонтальной оси — время).

В первых строках табл. 2—4 приведены результаты выявления зоны очага землетрясения, которое произошло в Грузии 26 марта 2013 г. Здесь временное распределение индикации начало станциями RNM АСП имело следующую последовательность: Siyezen — 04:15; Qum Adasy — 04:30; Shirvan — 06:50; Neftchala — 08:30. Системой выявлено, что это соответствует седьмому очагу ожидаемых землетрясений, причем здесь время опережения до землетрясения составило 8...10 часов.

Во вторых строках табл. 2—4 представлены результаты выявления зоны очага землетрясения, которое произошло в Грузии 27 и 28 мая 2013 г. Здесь станциями RNM АСП (Siyezen, Naftalan, Shirvan и Qum Adasy) более чем за 20 ч до начала землетрясения было зарегистрировано зарождение АСП. На рис. 4 приведены графики АСП, из которых видно, что северные (Siyezen) и северо-западные (Qum Adasy) станции зафиксировали аномалии раньше других. При этом имело место следующее временное распределение индикации начала станциями: Naftalan — 07:30; Siyezen — 09:10; Shirvan — 09:45; Qum Adasy — 11:40. Благодаря этому очаг землетрясения был выявлен системой примерно к 18 ч бакинского времени, что почти на 10...11 ч опередило время регистрации данных землетрясений наземными станциями.

В третьей и четвертой строках таб. 2—4 приведены результаты выявления зоны очага землетрясений, которые произошли 16 октября 2013 г. на юге России. Здесь зарождение АСП имело место на юго-востоке Кавказского региона, что было зарегистрировано станциями RNM АСП в следующей последовательности: Siyezen — 05:30, Qum Adasy — 08:00, Qazax — 10:00, Neftchala — 14:30. На основе этой комбинации временного распределения регистрации системой был выявлен седьмой очаг землетрясения, который соответствует северо-востоку Азербайджана, где действительно в 16—17 ч по Бакинскому времени произошло землетрясение.

Время выявления зоны очага опережало землетрясение примерно на 15 ч.

В пятых строках табл. 2—4 показаны результаты выявления зоны очага землетрясений, которое произошло 21 ноября 2013 г. на границе Иран—Ирак. Здесь, по результатам регистрации станциями RNM АСП: Naxchvan — 08:00; Qum Adasy — 09:00; Neftchala — 08:50, системой выявлен очаг ожидаемого землетрясения на 12 ч с опережением.

В шестых строках табл. 2—4 приведен результат выявления системой 9 января 2014 г. местонахождения зоны очага землетрясения, которое произошло на Caspian Sea, Offshore Azerbaijan, и было регистрировано станциями RNM АСП (Turkmen01 — 09:15, Qum Adasu — 09:25, Siyezen — 09:45 и Neftchala — 11:15) за 16 ч до землетрясения.

В седьмых строках табл. 2—4 представлен результат выявления системой очага ожидаемого землетрясения, которое произошло 13 января 2014 г. в Туркменистане. Система по комбинациям последовательности времен индикации станциями RNM АСП (Neftchala — 09:30, Siyezen — 10:45 и Qum Adasy — 11:30) показала местонахождение ожидаемого землетрясения в Туркменистане, т. е. в первом очаге. Время выявления очага ожидаемого землетрясения опережало время его регистрации более чем на 24 ч.

В восьмых строках табл. 2—4 приводятся результаты выявления зоны очага землетрясения, которое произошло 28 января 2014 г. на Западе Ирана. Здесь имела место комбинация времен регистрации станциями RNM АСП (Qum Adasy — 09:45, Shirvan — 07:30, Naxchvan — 04:50 и Neftchala — 11:20), позволившая выявить девятый очаг местонахождения ожидаемого землетрясения.

В девятых строках табл. 2—4 представлены результаты выявления зоны очага землетрясения, которое произошло в Азербайджане 9 и 10 февраля 2014 г. На рис. 5 приведены графики соответствующих АСП, из которых видно, что временное распределение их индикации станциями RNM АСП имеет следующую последовательность: Qum Adasy — 17:45, Shirvan — 12:45, Qazax — 19:00 и Naxchvan — 18:30, что дало возможность системе определить номер зоны очага (4) ожидаемого землетрясения системой с опережением времени регистрации землетрясения на 19 ч.

В десятых строках табл. 2—4 приведены результаты выявления зоны очага землетрясения, которое произошло 6 и 7 июня 2014 г. на Offshr Turkmenistan. В одиннадцатых строках табл. 2—4 приведена информация, соответствующая выявлению местонахождения ожидаемого землетрясения, которое произошло в первом очаге в Азербайджане 29 июня

Таблица 2

Результаты выявленных очагов ожидаемых землетрясений

№	Дата и время землетрясения	Широта и долгота землетрясения	Магнитуды и глубина эпицентра землетрясения	Местонахождение зоны очагов землетрясения
1	2013-03-26 23:35:24.0UTC	43.219 N 41.637 E	mb 5.1 10 km	Georgia (Sak'art'velo
2	2013-05-28 00:09:52.0 UTC	43.22 N 41.58 E	mb 5.2 2 km	Georgia (Sak'art'velo)
3	2013-09-17 04:09:14.0 UTC	42.17 N 45.89 E	mb 5.0 10 km	Caucasus Region, Russia
4	2013-09-17 04:09:13.0 UTC	42.13 N 45.80 E	Mw 5.1 2 km	Caucasus Region, Russia
5	2013-11-24 18:05:41.0 UTC	34.06 N 45.52 E	mb 5.6 2 km	Iran-Irag Border
6	2014-01-10 00:45:32.0 UTC	41.77 N 49.31 E	ML 5.0 87 km	Caspian Sea, Offshore Azerbaijan
7	2014-01-14 13:55:02.0 UTC	40.38 N 52.97 E	mb 5.1 50 km	Turkmenistan
8	2014-01-28 23:47:38.0 UTC	32.52 N 49.98 E	ML 5.1 33 km	Western Iran
9	2014-02-10 12:06:48.0 UTC	40.23 N 48.63 E	Mw 5.4 55 km	Azerbaijan
10	2014-06-07 06:05:32.1 UTC	40.32 N 51.55 E	mb 5.6 50 km	Offshr Turkmenistan
11	2014-06-29 17:26:10.4 UTC	41.62 N 46.68 E	mb 5.1 20 km	Azerbaijan

Таблица 3

Значения разности времени индикации АСП между станциями RNM АСПР

№	$\Delta\tau_{12}$	$\Delta\tau_{13}$	$\Delta\tau_{14}$	$\Delta\tau_{15}$	$\Delta\tau_{16}$	$\Delta\tau_{17}$	$\Delta\tau_{18}$	$\Delta\tau_{19}$
1	35	−120	—	135	*	—	*	—
2	−115	−150	−250	—	*	—	*	—
3	—	−150	—	390	*	120	*	—
4	—	−150	—	390	*	120	*	—
5	—	*	—	−10	−60	*	*	—
6	—	20	—	110	*	—	−10	—
7	—	−45	*	−120	*	*	—	—
8	−135	—	—	100	−300	—	—	—
9	−300	—	—	—	45	75	—	—
10	145	20	—	−70	—	—	—	120
11	305	−85	—	—	—	315	*	—

Таблица 4

Значения Noise характеристик начала процесса зарождения АСП

№	$R_{1X\varepsilon}$	$R_{2X\varepsilon}$	$R_{3X\varepsilon}$	$R_{4X\varepsilon}$	$R_{5X\varepsilon}$	$R_{6X\varepsilon}$	$R_{7X\varepsilon}$	$R_{8X\varepsilon}$	$R_{9X\varepsilon}$
1	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	300	50	100	—	140	—	—	—	—
2	150	150	160	250	—	—	—	—	—
3	100	—	40	—	80	—	80	—	—
4	100	—	40	—	80	—	80	—	—
5	160	—	—	—	150	250	—	—	—
6	110	—	110	—	110	—	—	40	—
7	160	—	100	—	120	—	—	—	—
8	120	110	—	—	—	180	—	—	—
9	75	130	—	—	—	260	230	—	—
10	80	25	40	—	100	—	—	—	80
11	100	20	120	—	—	—	25	—	—

2014 г. Здесь последовательность индикаций начала аномалий станциями RNM АСП (Siyezen — 00:50, Qum Adasy — 02:15, Shirvan — 07:20, Qazax — 07:30) позволила системе выявить местонахождение зоны очага ожидаемого землетрясения (Азербайджан).

Заключение

1. Интеллектуальная система, сформированная на основе сети сейсмоакустических станций RNM АСП и экспертной системы в сочетании с нейронной сетью, может быть использована как эффективный инструментарий для выявления местонахождения зоны очага ожидаемого землетрясения. При этом сейсмологу представляется информация, которая содержит номер зоны очага ожидаемого землетрясения, текущие комбинации параметров АСП, число, перечень, даты и магнитуды аналогичных комбинаций, которые были зарегистрированы в данном очаге при прошлых землетрясениях. Представленная информация позволяет оценивать степень достоверности полученного результата о местонахождении зоны очага ожидаемого землетрясения. Наличие достаточного времени до землетрясения дает возможность, в случае сомнения, привлечь к экспертной оценке других сейсмологов и исключить случайную ошибку.

2. Поскольку предложенная сеть станций RNM АСП построена на скважинах с различными глубинами, то все они имеют различные характеристики. Их трудно учесть как при идентификации и выявлении местонахождения зоны очага ожидаемого землетрясения, так и при определении его магнитуды. Кроме этого, стоимость скважины с увеличением глубины резко возрастает. Например, стоимость бурения скважины глубиной 4000...5000 м составляет 20...30 млн долларов. Поэтому для тех стран, где нет законсервированных нефтяных скважин, построение станций RNM АСП будет проблематично.

В связи с этим, в дальнейшем рекомендуется создание сети станций, построенных на водяных скважинах глубиной 50...100 м. При этом гидрофоны рекомендуется погружать на глубину 10...20 м. Для повышения достоверности и надежности результата определения местонахождения зоны очага ожидаемого землетрясения целесообразно строить сеть из большего числа станций (более 10...15), на скважинах с одинаковой глубиной, расположенных на равных расстояниях. Путем интеграции по спутниковой связи сетей станций RNM АСП стран нескольких соседних сейсмоактивных регионов в перспективе можно повысить степень достоверности и надежность определения координаты местонахождения ожидаемого землетрясения.

3. Эксперименты показали, что с увеличением мощности землетрясения улучшается надежность результатов мониторинга соответствующих АСП и повышается степень достоверности результатов выявления местонахождения зоны очага ожидаемого землетрясения. При мощности более 5 баллов практически во всех случаях результат выявления местонахождения ожидаемого землетрясения оказался достоверным. При этом оценка взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu)$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ по мере удаления от зоны очага землетрясения уменьшается. Оценка дисперсии помехи D_ε, наоборот, по мере удаления от зоны очага увеличивается. Соотношение $R_{X\varepsilon}(\mu)/R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu)$ по мере удаления уменьшается, а $D_\varepsilon/R_{X\varepsilon\varepsilon}$ — увеличивается. В различных грунтах, например, в воде, в песке, в глине и т. д., разница скорости распространения сейсмоакустического шума значительно отличается. При этом между глубиной скважин и дальностью радиуса мониторинга АСП имеется корреляционная связь.

4. Эксперименты на станции "Гум Адасы" в Каспийском море показали, что радиус мониторинга этой станции значительно шире, чем станций, 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.

5. По результатам, полученным на основе экспериментальных данных, можно предположить, что время опережения регистрации зарождения АСП сейсмоакустической станцией RNM АСП 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, сейсмоакустические волны преобразовываются в акустические сигналы и передаются со скоростью звука на поверхность Земли, где улавливаются с помощью 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 Noise-технологий путем анализа сейсмоакустического шума при появлении взаимосвязи между полезным сигналом и помехой фиксирует АСП в начале их зарождения. Благодаря этим двум факторам на станциях RNM АСП осуществляется индикация начала зарождения аномалии значительно раньше станций сейсмослужбы.

6. Сейсмоакустические станции мониторинга АСП также могут быть использованы для мониторинга скрытого периода процесса формирования вулканов значительно раньше их извержения. Кроме того, их применение также позволит осуществить мониторинг испытания больших и малых атомных бомб, а также других экспериментов, связанных с производством военной техники в масштабе регионов.

Список литературы

1. **Kanamori H., Brodsky E. E.** The physics of earthquakes // Reports on progress in physics. 2004. 67. P. 1429—1496.
2. **Tothong P., Cornell C. A.** An Empirical Ground-Motion Attenuation Relation for Inelastic Spectral Displacement // Bulletin of the Seismological Society of America. 2006. 96. P. 2146—2164.
3. **Ghahari F., Jahankhah H., Ghannad M. A.** Study on elastic response of structures to near-fault ground motions through record decomposition // Soil dynamics and earthquake engineering. 2010. 30. P. 536—546.
4. **Boore D. M., Bommer J. J.** Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2005. 25. P. 93—115.
5. **Galiana-Merino J. J., Parolai S., Rosa-Herranz J.** Seismic wave characterization using complex trace analysis in the stationary wavelet packet domain // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2011. 31. P. 1565—1578.
6. **Yee E., Stewart J. P., Schoenberg F. P.** Characterization and utilization of noisy displacement signals from simple shear device using linear and kernel regression methods // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2011. 31. P. 25—32.
7. **Pavlović V. D., Veličković Z. S.** Measurement of the seismic waves propagation velocity in the real medium // The scientific journal Facta Universitatis Series: Physics,Chemistry and Technology. 1998. 1. P. 63—73.
8. **Wang Y., Lu J., Shi Y., Yang C.** PS-wave Q estimation based on the P-wave Q values // Journal of geophysics and engineering. 2009. 39. P. 386—389.
9. **Mallat S. G.** A Theory of Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1989. 11 (7). P. 674—693.
10. **Vidakovic B., Lozoya C. B.** On time-dependent wavelet denoising // IEEE Transaction on Signal Processing. 1998. V. 46. N. 9. P. 2549—2554.
11. **Colak O. H., Destici T. C., Ozen S., Arman H., Cerezci O.** Frequency-energy characteristics of local earthquakes using discrete wavelet transform // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2006. 20. P. 38—41.
12. **Hutton D. V.** Fundamentals of finite element analysis. McGraw-Hill, 2004.
13. **Kislov K. V., Gravirov V. V.** Earthquake Arrival Identification in a Record with Technogenic Noise // Seismic Instruments. 2011. V. 47. N. 1. P. 66—79.
14. **Descherevsky A. V., Lukk A. A., Sidorin A. Y., Vstovsky G. V., Timashev S. F.** Flicker-noise spectroscopy in earthquake prediction research // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2003. 3. P. 159—164.
15. **Kossobokov V. G.** Testing earthquake prediction methods: the West Pacific short-term forecast of earthquakes with magnitude MwHRV ⩾ 5,8r // Tectono-physics. 2006. 413. P. 25—31.
16. **Shebalin P., Keilis-Borok V., Gabrielov A., Zaliapin I., Turcotte D.** Short-term earthquake prediction by reverse analysis of lithosphere dynamics // Tectonophysics, 2006. 413. P. 63—75.
17. **Larionov I. A., Sherbina A. O., Mishenko M. A.** Geoacoustic emissions response on the process of earthquake preparation at different observation points. Bulleting of KRAESC. Earth Sciences. 2005. 6. 108—115.
18. **Aliev T. A., Alizada T. A., Abbasov A. A.** Method for monitoring the beginning of anomalous seismic process. International Application No PCT/AZ2005/ 000006, Pub. No WO2006/130933, International Filling Date — December 19, 2005.
19. **Aliev T. A., Abbasov A. A., Aliev E. R., Guluev G. A.** Method for monitoring and forecasting earthquakes. International Application No PCT/AZ2006/00000, Pub. No WO2007/143799, International Filling Date — June 16, 2006.
20. **Алиев Т., Аббасов А., Ализаде А., Етирмишли Г., Гулуев Г., Пашаев Ф.** Интеллектуальный мониторинг аномальных сейсмических процессов на острове Песчаный Каспийского моря с использованием робастной помехотехнологии // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 5. С. 22—28.
21. **Aliev T. A., Abbasov A. M., Quluyev G. A., Pashayev F. H., Sattarova U. E.** Technologies and systems for minimization of damage from destructive earthquakes // Seismoforecasting researches carried out in the Azerbaijan territory. 2012. P. 449—464.
22. **Aliev T.** Noise Technologies for Minimization of Damage Caused by Earthquakes. Germany: Lambert Academic Publishing, 2012.
23. **Hashemi M., Alesheikh A. A.** A GIS-based earthquake damage assessment and settlement methodology // Soil dynamics and earthquake engineering. 2011. 31. P. 1607—1617.
24. **Aliev T. A., Abbasov A. M., Aliev E. R., Guluev G. A.** Digital technology and the system for receiving and analyzing the information from deep earth layers for noise—monitoring the technical state of the socially—significant objects // Automatic Control and Computer Sciences. 2007. 41. P. 59—67.
25. **Hatzigeorgiou G. D., Beskos D. E.** Soil-structure interaction effects on seismic inelastic analysis of 3-D tunnels // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2010. 30. P. 851—861.
26. **Papagiannopoulos G. A., Beskos D. E.** On a modal damping identification model for building structures // Archive of Applied Mechanics. 2006. 76. P. 443—463.
27. **Papagiannopoulos G. A., Beskos D. E.** On a modal damping identification model for non-classically damped structures subjected to earthquakes // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2009. 29. P. 583—589.
28. **Zafarani H., Noorzad A., Ansari A., Bargi K.** Stochastic modeling of Iranian earthquakes and estimation of ground motion for future earthquakes in Greater Tehran // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2009. 29. P. 722—741.
29. **Sokolov V. Y., Loh C. H., Wen K. L.** Evaluation of hard rock spectral models for the Taiwan region on the basis of the 1999 Chi—Chi earthquake data // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2003. 23. P. 715—735.
30. **Stankiewicz J., Bindi D., Oth A., Parolai S.** Designing efficient earthquake early warning systems: case study of Almaty, Kazakhstan // Journal of Seismology. 2013. V. 17, Iss. 4. P. 1125—1137.
31. **Rydelek P., Pujol J.** Real-Time Seismic Warning with a Two-Station Subarray // Bulletin of the Seismological Society of America. 2004. V. 94, N. 4. P. 1546—1550.
32. **Tsuboi S., Saito M., Kikuchi M.** Real-time earthquake warning by using broadband P Waveform // Geophysical research letters. 2002. 29. P. 2187—2191.
33. **Kanamori H.** Real-time seismology and earthquake damage mitigation // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2005. 33. P. 195—214.
34. **Lockwood O. G., Kanamori H.** Wavelet analysis of the seismograms of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake and its application to tsunami early warning // Ge ochemistry Geophysics Geosystems, 2006. 7. P. 1—10. URL: http://www.agu.org/journals/abs/2006/2006GC001272.shtml
35. **Alcik H., Ozel O., Wu Y. M., Ozel N. M., Erdik M.** An alternative approach for the Istanbul earthquake early warning system // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2011. 31. P. 181—187.
36. **Wang J. P., Wu Y. M., Lin T. L., Brant L.** The uncertainties of a Pd3-PGV onsite earthquake early warning system // Soil dynamics and earthquake engineering. 2012. 36. P. 32—37.
37. **Moser P., Moaveni B.** Design and Deployment of a Continuous Monitoring System for the Dowling Hall Footbridge // Society for Experimental Mechanics. Experimental Techniques. 2013. 37. P. 15—26.
38. **Satriano C, Yih-MinWub, Aldo Zollo, Hiroo Kanamori.** Earthquake early warning: Concepts, methods and physical grounds // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2011. 31. P. 106—118.
39. **Aliev T. A., Abbasov A. M., Guluyev Q. A., Pashaev F. H., Sattarova U. E.** System of robust noise monitoring of anomalous seismic processes // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2013.
40. **Aliev T.** Digital noise monitoring of defect origin. London: Springer-Verlag, 2007.
41. **Aliev T. A.** Robust Technology with Analysis of Interference in Signal Processing, New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003.

42. **Aliev T. A., Guluyev G. A., Pashayev F. H., Sadygov A. B.** Noise monitoring technology for objects in transition to the emergency state // Mechanical Systems and Signal Processing. 2012. 27. P. 755—762.

43. **Aliev T. A., Alizade A. A., Etirmishli G. D., Guluev G. A., Pashaev F. G., Rzaev A. G.** Intelligent Seismoacoustic System for Monitoring the Beginning of Anomalous Seismic Process // Seismic Instruments. 2011. V. 47, N. 1. P. 1—9.

44. **Aliev T. A., Abbasov A. M., Mamedova G. G., Guluev G. A., Pashaev F. G.** Technologies for Noise Monitoring of Abnormal Seismic Processes // Seismic In struments. 2013. V. 49, N. 1. P. 64—80.

45. **Pujol J.** Earthquake location tutorial: a graphical approach and approximate epicentral locations techniques // Seism. Res. Lett. 75. 2004. N. 1. P. 63—74.

46. **Sambridge M., Ghallagher K.** Earthquake hypocenter location using genetic algorithms // Bulletin of the Seismological Society of America. 1993. V. 83, N. 5. P. 1467—1491.

47. **Mehdi Khashei, Mehdi Bijari.** An artificial neural network (p, d, q) model for timeseries forecasting // Expert Systems with Applications. 2010. 37. P. 479—489.

48. **Rojas R.** Neural networks. Berlin: Springer—Verlag, 1996.

Intelligent Seismic-Acoustic System for Identifying the Location of the Focus of an Expected Earthquake

A. M. Pashayev[1], info@naa.baku.az, **A. A. Alizada**[2], president@science.az,
T. A. Aliev[3], telmancyber@rambler.ru, **A. M. Abbasov**[4], ali@elm.az,
G. A. Guluyev[3], scb06@mail.ru, **F. G. Pashayev**[3], pasha.farhad@gmail.com,
U. E. Sattarova[3], ulker.rzaeva@gmail.com
[1]Azerbaijan National Academy of Aviation, Az1045, Baku, Azerbaijan Republic,
[2] Azerbaijan National Academy of Sciences, Az1001, Baku, Azerbaijan Republic,
[3] Institute of Control Systems of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Az1141, Baku, Azerbaijan Republic,
[4] Ministry of Communications and High Technologies, Az1000, Baku, Azerbaijan Republic

Date received: 05.11.14

This paper presents a brief review of the state-of-the-art in the field of earthquake study and forecasting. We analyze the principles of the methods for determination of the coordinates of earthquake focuses by means of ground seismic stations. We demonstrate that those methods cannot be used in the system for monitoring of the beginning of the earthquake preparation process (in the network of RNM ASP stations).

As we know, the beginning of the earthquake process is accompanied by spreading of noisy seismic-acoustic signals. Theoretically, the system for monitoring of the beginning of the earthquake process is based on the technologies for seismic-acoustic signal processing — Robust Noise Monitoring (RNM). The noise characteristics determined by RNM technologies indicate the beginning of the anomalous seismic processes (ASP) and, consequently, a possibility of ASP monitoring.

Considering that the seismic-acoustic signal can be represented as the sum of the useful signal and noise ($g = X + \varepsilon$), we present the technologies for determining noise characteristics. It is demonstrated in the paper that a change in the estimate of the cross-correlation function $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ between the useful signal $X(i\Delta t)$ and the noise $\varepsilon(i\Delta t)$, noise variance D_ε and the value of noise correlation $R_{X\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0)$ determine the beginning of ASP. One RNM ASP station determines the beginning of ASP within a radius of about 500 km. Determination of the location of an expected earthquake requires a network of RNM ASP stations.

We analyze the results of the noise technology-based monitoring of the anomalous seismic processes performed from July 2010 to June 2014 by nine seismic-acoustic stations built at the head of 10 m, 200 m, 300 m and 1400—5000 m deep wells. Based on the results of the experimental data obtained in the period covering over three years, an intelligent system has been built, which allows us to identify the location of the zone of an earthquake, using the combinations of time of change in the estimate of the correlation function between the useful signal and the noise of the seismic-acoustic information received from different stations 10—20 hours before the earthquake. In the long term, the system can be used by seismologists as a tool for determination of the location of the zone of an expected earthquake.

Keywords: *seismic monitoring, anomalous seismic processes, intelligent seismic-acoustic system, robust noise technology, processing of seismic-acoustic information, expert system, neural network forecasting of earthquake zones*

For citation:

Pashayev A. M., Alizada A. A., Aliev T. A., Abbasov A. M., Guluyev G. A., Pashayev F. G., Sattarova U. E. Intelligent Seismic-Acoustic System for Identifying the Location of the Focus of an Expected Earthquake, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 147—158.*

DOI: 10.17587/mau/16.147-158

References

1. **Kanamori H., Brodsky E. E.** The physics of earthquakes. *Reports on Progress in Physics*, 2004, vol. 67, pp. 1429—1496.

2. **Tothong P., Cornell C. A.** An Empirical Ground-Motion Attenuation Relation for Inelastic Spectral Displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, vol. 96, pp. 2146—2164.

3. **Ghahari F., Jahankhah H., Ghannad M. A.** Study on elastic response of structures to near-fault ground motions through record decomposition, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, vol. 30, pp. 536—546.

4. **Boore D. M., Bommer J. J.** Processing of strong-motion accelerograms, needs, options and consequences, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005, vol. 25, pp. 93—115.

5. **Galiana-Merino J. J., Parolai S., Rosa-Herranz J.** Seismic wave characterization using complex trace analysis in the stationary wavelet packet domain, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 1565—1578.

6. **Yee E., Stewart J. P., Schoenberg F. P.** Characterization and utilization of noisy displacement signals from simple shear device using linear and kernel regression methods, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 25—32.

7. **Pavlović V. D., Veličković Z. S.** Measurement of the seismic waves propagation velocity in the real medium. *The scientific journal Facta Universitatis, Series, Physics, Chemistry and Technology*, 1998, vol. 1, pp. 63—73.

8. **Wang Y., Lu J., Shi Y., Yang C.** PS-wave *Q* estimation based on the P-wave *Q* values, *Journal of Geophysics and Engineering*, 2009, vol. 39, pp. 386—389.

9. **Mallat S. G.** A Theory of Multiresolution Signal Decomposition, The Wavelet Representation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, July 1989, vol. 11, iss. 7, pp. 674—693.

10. **Vidakovic B., Lozoya C. B.** On time-dependent wavelet denoising, *IEEE Transaction on Signal Processing*, 1998, vol. 46, no. 9, pp. 2549—2554.

11. **Colak O. H., Destici T. C., Ozen S., Arman H., Cerezci O.** Frequency-energy characteristics of local earthquakes using discrete wavelet transform (DWT), *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2006, vol. 20, 38—41.

12. **Hutton D. V.** Fundamentals of finite element analysis, New York, McGraw-Hill, 2004, pp. 494.

13. **Kislov K. V., Gravirov V. V.** Earthquake Arrival Identification in a Record with Technogenic Noise, *Seismic Instruments*, 2011, vol. 47, no. 1, pp. 66—79.

14. **Descherevsky A. V., Lukk A. A., Sidorin A. Y., Vstovsky G. V., Timashev S. F.** Flicker-noise spectroscopy in earthquake prediction research, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, vol. 3, pp. 159—164.

15. **Kossobokov V. G.** Testing earthquake prediction methods: the West Pacific short-term forecast of earthquakes with magnitude MwHRV ⩾5,8r, *Tectonophysics*, 2006, vol. 413, pp. 25—31.

16. **Shebalin P., Keilis-Borok V., Gabrielov A., Zaliapin I., Turcotte D.** Short-term earthquake prediction by reverse analysis of lithosphere dynamics, *Tectonophysics*, 2006, vol. 413, pp. 63—75.

17. **Larionov I. A., Sherbina A. O., Mishenko M. A.** *Bulleting of KRAESC. Earth Sciences*, 2005, vol. 6, pp. 108—115.

18. **Aliev T. A., Alizada T. A., Abbasov A. A.** Method for monitoring the beginning of anomalous seismic process, *International Application No PCT/AZ2005/000006, Pub. No WO2006/130933, International Filling Date — December 19, 2005.*

19. **Aliev T. A., Abbasov A. A., Aliev E. R., Guluev G. A.** Method for monitoring and forecasting earthquakes, *International Application No PCT/AZ2006/00000, Pub. No WO2007/143799, International Filling Date — June 16, 2006.*

20. **Aliev T., Abbasov A., Alizade A., Etirmishli G., Guluev G., Pashaev F.** Intellectual Monitoring of Abnormal Seismic Process at the Gum Island of Caspian Sea with Use Robast Strays'es Technology, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2011, no. 5, pp. 22—28. (in Russian)

21. **Aliev T. A., Abbasov A. M., Quluyev G. A., Pashayev F. H., Sattarova U. E.** Technologies and systems for minimization of damage from destructive earthquakes, *Seismoforecasting Researches Carried out in the Azerbaijan Territory*, 2012, pp. 449—464.

22. **Aliev T.** Noise Technologies for Minimization of Damage Caused by Earthquakes, Germany: Lambert Academic Publishing, 2012, 220 p.

23. **Hashemi M., Alesheikh A. A.** A GIS-based earthquake damage assessment and settlement methodology, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 1607—1617.

24. **Aliev T. A., Abbasov A. M., Aliev E. R., Guluev G. A.** Digital technology and the system for receiving and analyzing the information from deep earth layers for noise-monitoring the technical state of the socially-significant objects, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2007, vol. 41, pp. 59—67.

25. **Hatzigeorgiou G. D., Beskos D. E.** Soil-structure interaction effects on seismic inelastic analysis of 3-D tunnels, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2010, vol. 30, pp. 851—861.

26. **Papagiannopoulos G. A., Beskos D. E.** On a modal damping identification model for building structures, *Archive of Applied Mechanics*, 2006, vol. 76, pp. 443—463.

27. **Papagiannopoulos G. A., Beskos D. E.** On a modal damping identification model for non-classically damped structures subjected to earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, vol. 29, pp. 583—589.

28. **Zafarani H., Noorzad A., Ansari A., Bargi K.** Stochastic modeling of Iranian earthquakes and estimation of ground motion for future earthquakes in Greater Tehran, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, vol. 29, pp. 722—741.

29. **Sokolov V. Y., Loh C. H., Wen K. L.** Evaluation of hard rock spectral models for the Taiwan region on the basis of the 1999 Chi—Chi earthquake data, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2003, vol. 23, pp. 715—735.

30. **Stankiewicz J., Bindi D., Oth A., Parolai S.** Designing efficient earthquake early warning systems: case study of Almaty, Kazakhstan, *Journal of Seismology*, October 2013, vol. 17, iss. 4, pp. 1125—1137.

31. **Rydelek P., Pujol J.** Real-Time Seismic Warning with a Two-Station Subarray, *Bulletin of the Seismological Society of America*, August 2004, vol. 94, no. 4, pp. 1546—1550.

32. **Tsuboi S., Saito M., Kikuchi M.** Real-time earthquake warning by using broadband P Waveform, *Geophysical Research Letters*, 2002, vol. 29, 2187—2191.

33. **Kanamori H.** Real-time seismology and earthquake damage mitigation, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2005, vol. 33, pp. 195—214.

34. **Lockwood O. G., Kanamori H.** Wavelet analysis of the seismograms of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake and its application to tsunami early warning, *Geochemistry Geophysics Geosystems,* 2006, vol. 7, 1—10, available at http://www.agu.org/iournals/abs/2006/2006GC001272.shtml

35. **Alcik H., Ozel O., Wu Y. M., Ozel N. M., Erdik M.** An alternative approach for the Istanbul earthquake early warning system, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 181—187.

36. **Wang J. P., Wu Y. M., Lin T. L., Brant L.** The uncertainties of a Pd3-PG V onsite earthquake early warning system, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 2012, vol. 36, pp. 32—37.

37. **Moser P., Moaveni B.** Design and Deployment of a Continuous Monitoring System for the Dowling Hall Footbridge, *Experimental Techniques, Society for Experimental Mechanics*, 2013, vol. 37, pp. 15—26.

38. **Satriano C, Yih-MinWub, Aldo Zollo, Hiroo Kanamori.** Earthquake early warning: Concepts, methods and physical grounds, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 106—118.

39. **Aliev T. A., Abbasov A. M., Guluyev Q. A., Pashaev F. H., Sattarova U. E.** System of robust noise monitoring of anomalous seismic processes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, vol. 31, 33, pp. 11—15.

40. **Aliev T.** Digital noise monitoring of defect origin, Springer-Verlag, London, 2007, 223 p.

41. **Aliev T. A.** Robust Technology with Analysis of Interference in Signal Processing, Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York, 2003, 199 p.

42. **Aliev T. A., Guluyev G. A., Pashayev F. H., Sadygov A. B.** Noise monitoring technology for objects in transition to the emergency state, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, vol. 31, 27, pp. 755—762.

43. **Aliev T. A., Alizade A. A., Etirmishli G. D., Guluev G. A., Pashaev F. G., Rzaev A. G.** Intelligent Seismoacoustic System for Monitoring the Beginning of Anomalous Seismic Process, *Seismic Instruments*, 2011, vol. 47, no. 1, pp. 1—9.

44. **Aliev T. A., Abbasov A. M., Mamedova G. G., Guluev G. A., Pashaev F. G.** Technologies for Noise Monitoring of Abnormal *Seismic Processes, Seismic Instruments*, 2013, vol. 49, no. 1, pp. 64—80.

45. **Pujol J.** Earthquake location tutorial: a graphical approach and approximate epicentral locations techniques, *Seism. Res. Lett.* 2004, 75, no. 1, pp. 63—74.

46. **Sambridge M., Ghallagher K.** Earthquake hypocenter location using genetic algorithms, *Bulletin of the Seismological Society of America,* October 1993, vol. 83, по. 5, pp. 1467—1491.

47. **Mehdi Khashei, Mehdi Bijari.** An artificial neural network (p, d, q) model for timeseries forecasting, *Expert Systems with Applications,* 2010, vol. 31, 37, pp. 479—489.

48. **Rojas R.** Neural networks, Berlin, Springer-Verlag, 1996, pp. 479.

Corresponding author:

Pashayev Farhat G., PhD, Leading Researcher, Institute of Control Systems of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Az1141, Baku, Azerbaijan Republic, e-mail: pasha.farhad@gmail.com