

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-3.280>

УДК 550.34.03

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ РАННЕГО ОПОВЕЩЕНИЯ О СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ В УСЛОВИЯХ РЕДКОЙ СЕТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Ибрагимов А.Х.

*Цель.* Разработка системы раннего оповещения о сильных землетрясениях в условиях редкой сети сейсмических станций.

*Методы.* Исследования проводятся в трех направлениях – оперативная автоматическая генерация карт изосейст после события, создание акселерометров с возможностью отправки данных на центральный сервер с последующим расчетом ожидаемой интенсивности колебаний и времени ожидания события и разработка прибора, непрерывно рассчитывающего спектр колебаний по вертикальной компоненте и подающего сигнал при поступлении волны с периодом больше 2 с и величиной ускорений определенной величины.

*Результаты.* Получены зависимости величины землетрясения от периода  $P$ -волны и пиковой амплитуды смещения грунта. Создана система автоматического построения карт изосейст сильных событий, запущен сервер сбора данных от удаленных станций, отправляющий предупреждение об ожидаемом землетрясении посредством telegram-bot.

*Область применения исследований.* Полученные результаты дают возможность реализовать систему предупреждения о сильных землетрясениях, которая может быть использована в МЧС для оперативной оценки ситуации, защиты особо важных объектов (плотин крупных водохранилищ, атомных электростанций и т. д.).

*Ключевые слова:* землетрясение, раннее оповещение, период, скорость смещения грунтов, ускорение.

(Поступила в редакцию 21 мая 2020 г.)

### Введение

К настоящему времени системы раннего оповещения о возникновении сильного землетрясения эффективно используются в Японии, Тайване, Мексике, тестируются в США, Греции, Румынии, Турции (в рамках проекта REAKT и SAFER). В Центральной Азии была начата разработка прототипа системы оповещения на основе SOSEWIN (GFZ), но пока информация о результатах не опубликована.

Алгоритмы работы подобных систем детально описаны в работах сейсмологов США, Японии и Италии [1].

В рамках Государственной программы по уменьшению ущерба от стихийных бедствий в Узбекистане разрабатывается прототип системы экстренного оповещения о сильных землетрясениях.

### Основная часть

#### Принцип действия системы раннего оповещения о землетрясениях (СРОЗ)

Принцип действия СРОЗ основан на следующем. Очаг события генерирует три типа волн: продольные ( $P$ ), поперечные ( $S$ ) и поверхностные (волны Лява,  $L$  и Релея,  $R$ ). По параметрам  $P$ -волны система определяет магнитуду землетрясения и рассчитывает интенсивность создаваемых  $S$ - и  $LR$ -волнами сейсмических воздействий на защищаемой территории.

#### Алгоритмы работы СРОЗ

1. **ElarmS** – определяет энергию, излучаемую очагом землетрясения. Используется спектр  $P$ -волны по данным нескольких станций. По эмпирической модели затухания энергии с расстоянием оценивается интенсивность на сотрясаемой площади. Методология позволяет

генерировать сигнал тревоги до прихода  $S$ - и  $LR$ -волн. Метод требует применения данных не менее 4 станций [1]. Применение алгоритма ElarmS с учетом задержки потока данных при его передаче в центр обработки, для эпицентральных расстояний менее 125 км нецелесообразно, т. к. тревога будет генерироваться одновременно с приходом поперечных и поверхностных сейсмических волн.

2. **Virtual Seismologist (VS method)** – метод «Виртуальный сейсмолог» [3] использует огибающие ускорения, скорости и смещения грунта в качестве входных данных в систему многофакторного вероятностного комплексного анализа, реализующую байесовский подход к раннему предупреждению о землетрясениях. Здесь применяется множество параметров, таких как топология сети, текущая сейсмическая активность, модель вспарывания в очаге и др. В основу метода входит робастный анализ параметрических данных.

3. **Onsite method** –  $\tau_c$ - $P_d$  алгоритм [2], основанный на определении магнитуды землетрясения по периоду  $\tau_c$  и пиковой амплитуде смещения грунта  $P_d$  первого вступления  $P$ -волны. Этот алгоритм позволяет быстро определять магнитуду событий, однако менее точен в сравнении с алгоритмами определения параметров событий по данным ряда станций.

Сеть сейсмического мониторинга территории Узбекистана включает 40 стационарных пунктов регистрации, из них 16 станций в режиме онлайн, т. е. остальные пункты для реализации системы раннего оповещения неприменимы. Еще одна проблема – станции, расположенные вблизи очаговых зон, как правило, размещены в горной местности и, соответственно, не обеспечены возможностью передачи данных в режиме реального времени.

Изучение конфигурации национальной сети сейсмического мониторинга показало неэффективность применения методов ElarmS и Virtual Seismologist, требующих использования данных четырех и более сейсмостанций. С учетом длительности пакетов данных SeedLink (протокол сейсмологических данных) – 8 с, использование описанных выше алгоритмов нецелесообразно. На рисунке 1 приведена диаграмма времени предупреждения с применением различных алгоритмов.

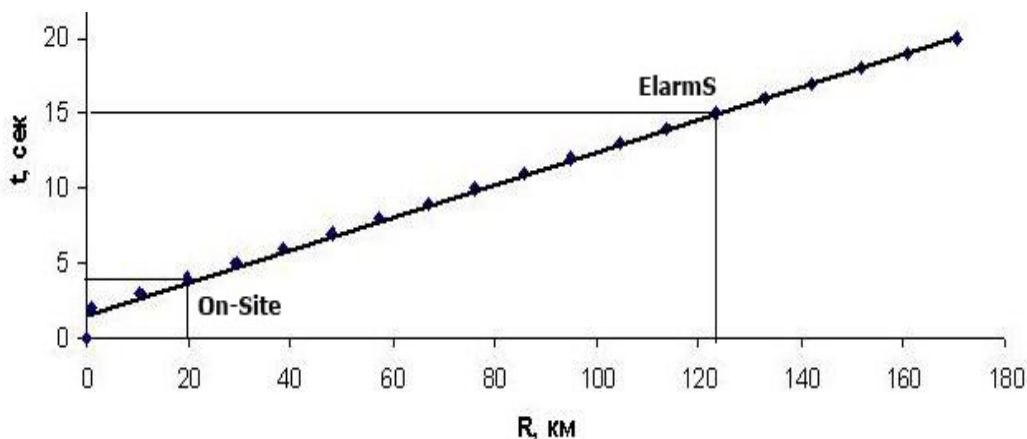


Рисунок 1. – Время определения магнитуды события с использованием On-Site и ElarmS

### Направления исследований

Исследования проводятся в трех направлениях. Первое направление – разработка программного обеспечения, автоматически захватывающего информацию о последнем сильном землетрясении (парсинг координат, магнитуды и глубины) от системы автолокации Earthworm [4] и генерирующего карту изосейст. Система Earthworm запущена в апреле 2018 г., и в нее внесен усредненный региональный годограф. Программа IntMap зарегистрирована в Агентстве по интеллектуальной собственности при Министерстве юстиции Республики Узбекистана (свидетельство № DGU 07095 от 12 сентября 2019 г.).

В течение 2–3 минут производится определение параметров сейсмического события и выводится карта изосейст на территории Республики Узбекистан на Google Map.

На рисунке 2 представлен интерфейс парсера и программы IntMap v3.0.

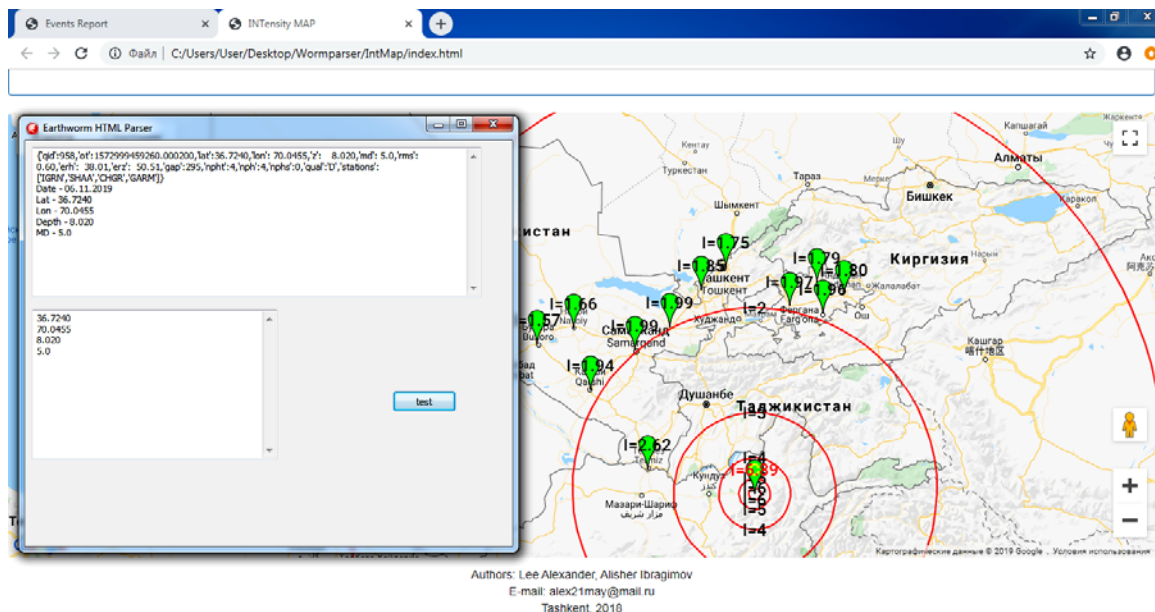


Рисунок 2. – Интерфейс программы IntMap v3.0

Второе направление – разработка бюджетного акселерографа на базе микроконтроллера ARDUINO UNO-3 и цифрового MEMS-акселерометра ADXL-345. К настоящему времени прибор изготовлен и проводится тестирование его устойчивой работы. Он оснащен Ethernet-адаптером для подключения к сети. Исходя из возможности оперативной передачи данных предложена следующая топология системы оповещения: выбирается станция, работающая в онлайн-режиме, максимально близко расположенная к очаговой зоне. Акселерометр, установленный в пункте регистрации, отправляет пиковые значения ускорений при приходе сейсмического события на сервер сбора данных. В 2020 г. планируется несколько приборов установить на сейсмических станциях, расположенных вблизи очаговых зон (ст. «Фергана» – 35 км от Южно-Ферганского разлома (рис. 3), Канское землетрясение 2011 г. с  $M = 6,1$ ; ст. «Китаб» – в 18 км от события 2016 г. с  $M = 5,0$ ; ст. «Байсун» – в 150 км от очага Каратагского события с  $M = 7,1$ ).



Рисунок 3. – Сейсмические лучи от зоны возможного очага землетрясения и ст. «Фергана»: от Южно-Ферганского разлома S-волны приходят в Ташкент за 71 с, от ст. «Фергана» – за 66 с; от очага до ст. «Фергана» S-волны волны приходят за 8 с. Время ожидания в Ташкенте составляет 58 с

Подключенные к каналу связи приборы при срабатывании триггера по величине ускорений отправляют на сервер их значение. Программа на сервере при поступлении информации от удаленной станции по значению ускорений рассчитывает величину интенсивности в Ташкенте (в данном случае – защищаемый объект) и время ожидания прихода сильных колебаний. Для оперативного информирования разработан telegram-bot, отправляющий информацию подобного вида:

2020-05-13 18:59:16 – Событие на датчике DZI (Джизак).  
Интенсивность в Ташкенте 3,5.  
Время прихода в Ташкент 48,6 с.

Третье направление – разработка программного комплекса и прибора для непрерывного FFT-анализа в режиме реального времени для оценки параметров ожидаемых сильных событий по периоду и амплитуде ускорений, поступающих с MEMS-акселерометра. Система работает по принципу прибора P-alert, разработанного в Тайване [6], но использует другие алгоритмы. В данном случае вычислительных ресурсов микроконтроллера недостаточно, и необходимо использовать компьютер. Принцип действия следующий. На долю поперечных и поверхностных волн обычно приходится до 80 % энергии землетрясения, т.е. ими вызываются наибольшие колебания. Скорость распространения *P*-волны в зависимости от свойств геологической среды варьируется в пределах 6–8 км/с. Скорость же *S*- и *LR*-волн не превышает 3,5 км/с. При эпицентральной расстоянии 100 км разница во времени прихода продольных и других волн составляет 12,6 с; при 200 км – 23,2 с; при 300 км – 33 с.

При определении магнитуды землетрясения по параметрам *P*-волны за 3–5 с появляется возможность предупреждения о приходе сильных колебаний от землетрясения. Был проведен анализ 1500 сейсмограмм событий с магнитудой 6–9, полученных из BUD IRIS (унифицированная база волновых форм IRIS). Проведенные исследования позволили получить следующие зависимости. Магнитуда по смещению определяется по формуле:

$$M_w = 5,07 + 1,24 \ln(k_p P_d) + 1,65 \ln(k_R R_\varepsilon), \quad (1)$$

где  $M_w$  – магнитуда по шкале Канамори;  $P_d$  – пиковая амплитуда смещения грунта, мм;  $R_\varepsilon$  – эпицентральной расстояние, км; коэффициенты  $k_p = 1 \text{ мм}^{-1}$ ,  $k_R = 1 \text{ км}^{-1}$ .

Магнитуда по преобладающему периоду *P*-волны вычисляется по формуле:

$$M_w = 5,22 + 6,66 \ln(k_t t_p), \quad (2)$$

где  $t_p$  – период *P*-волны, с; коэффициент  $k_t = 1 \text{ с}^{-1}$ .

Возникает вопрос: что дает 20–60 с оповещения об ожидаемом землетрясении? Согласно результатам научных исследований, предупреждение о землетрясении за 3 с до его начала позволяет сократить 14 % несчастных случаев, за 10 с – 39 %, 20 с – 63 % человеческих жертв и травм [5].

### Заключение

Приведенные результаты дают возможность реализовать систему оповещения о сильных землетрясениях в различных решениях:

1. Оповещение о приходе колебаний на защищаемую территорию с указанием ожидаемой интенсивности в баллах по шкале EMS-98 и времени начала сейсмических воздействий.
2. Оповещение о возникновении землетрясения с большой магнитудой ( $M > 5$ ).
3. Оперативная генерация карт изосейст после прихода сейсмических волн от сильных землетрясений.

4. Реализация алгоритмов ElarmS или Virtual Seismologist возможна при применении протокола передачи данных UDP (без проверки полноты отправленной информации) или по протоколу GDI, разработанному в компании Guralp, который, по заявлению разработчиков, в 25 раз быстрее протокола SeedLink. В этом случае необходимо использование отдельных сейсмических станций со своими каналами передачи данных.

Работа выполнена в рамках гранта Министерства инновационного развития Республики Узбекистан № ПЗ-20170921217.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Allen, R.M. The status of earthquake early warning around the world: an introductory overview / Richard M. Allen, Paolo Gasparini, Osamu Kamigaichi and Maren Böse // *Seismological Research Letters*, September/October 2009. – Vol. 80, No. 5. – Pp. 682–693. DOI: 10.1785/gssrl.80.5.682.
2. Kanamori, H. Real-time seismology and earthquake damage mitigation / Hiroo Kanamori // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2005. – Vol. 33. – Pp. 195–214. DOI: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122626.
3. Wurman, G. Earthquake Early Warning and the Physics of Earthquake Rupture / A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. – University of California, Berkeley. – 2010. – 97 p.
4. Earthworm Central [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.earthwormcentral.org/>. – Date of access: 17.05.2020.
5. Wu, YM. et al. Earthquake Early Warning System in Taiwan // *Encyclopedia of Earthquake Engineering*; ed. by M. Beer, I. Kougioumtzoglou, E. Patelli, I. Au. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-36197-5\_99-1.
6. Earthquake Early Warning System Palert [Electronic resource]: Jenlogix Industrial Technology Partner. – Mode of access: <https://www.earthquakeearlywarning.systems/palert.html>. – Date of access: 17.05.2020.

**Оценка эффективности системы раннего оповещения о сильных землетрясениях  
в условиях редкой сети сейсмических станций**

**Assessment of the effectiveness of the early warning system for severe earthquakes  
in a rare network of seismic stations**

**Ибрагимов Алишер Хайдарович**

кандидат физико-математических наук

Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова  
Академии наук Республики Узбекистан,  
лаборатория экспериментальной  
сейсмологии, заведующий лабораторией

Адрес: ул. Зулфияхоним, 3,  
100128, г. Ташкент, Узбекистан

e-mail: alisher1957@mail.ru

ORCID: 0000-0002-7190-0116

**Alisher Kh. Ibragimov**

PhD in Physical and Mathematical Sciences

Mavlyanov Institute of Seismology of Academy  
of Science of the Republic of Uzbekistan,  
Laboratory of Experimental Seismology,  
Head of Laboratory

Address: ul. Zulfiyahonim, 3,  
100128, Tashkent, Uzbekistan

e-mail: alisher1957@mail.ru

ORCID: 0000-0002-7190-0116

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-3.280>

## ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF THE EARLY WARNING SYSTEM FOR SEVERE EARTHQUAKES IN A RARE NETWORK OF SEISMIC STATIONS

Ibragimov A.Kh.

*Purpose.* Development of an early warning system for strong earthquakes in a rare network of seismic stations.

*Methods.* Research is carried out in three directions: operational automatic generation of isoseist maps after the event, creation of accelerometers with the ability to send data to a central server with subsequent calculation of the expected intensity of the oscillations and the waiting time of the event, and the development of a device that continuously calculates the oscillation spectrum from the vertical component and gives a signal upon receiving a wave with a period of more than 2 s and the magnitude of the accelerations of a certain value.

*Findings.* The dependences of the magnitude of the earthquake on the period of the P-wave and the peak amplitude of the displacement of the soil are obtained. A system for automatically constructing maps of isoseist strong events has been created, a server has been launched to collect data from remote stations, which sends a warning about an expected earthquake via telegram-bot.

*Application field of research.* The results obtained make it possible to implement a warning system about strong earthquakes, which can be used in the Ministry for Emergencies to assess the situation, protect critical facilities (dams of large reservoirs, nuclear power plants, etc.) quickly.

*Keywords:* earthquake, early warning, period, soil displacement rate, acceleration.

(The date of submitting: May 21, 2020)

### REFERENCES

1. Richard M. Allen, Gasparini P., Kamigaichi O., Böse M. The status of earthquake early warning around the world: an introductory overview. *Seismological Research Letters*, September/October 2009. Vol. 80, No. 5. Pp. 682–693. DOI: 10.1785/gssrl.80.5.682.
2. Kanamori Hiroo. Real-time seismology and earthquake damage mitigation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2005. Vol. 33. Pp. 195–214. DOI: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122626.
3. Wurman G. *Earthquake Early Warning and the Physics of Earthquake Rupture*. A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. University of California, Berkeley. 2010. 97 p.
4. *Earthworm Central*, available at: <http://www.earthwormcentral.org/> (accessed: May 17, 2020).
5. Wu YM., Hsiao NC., Chin TL., Chen DY., Chan YT., Wang KS. Earthquake Early Warning System in Taiwan. *Encyclopedia of Earthquake Engineering*; ed. by Beer M., Kougiumtzoglou I., Patelli E., Au IK. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-36197-5\_99-1.
6. Earthquake Early Warning System Palert. *Jenlogix Industrial Technology Partner*, available at: <https://www.earthquakeearlywarning.systems/palert.html> (accessed: May 17, 2020).