

## ПРЕДВАРИТЕЛНИ ПРОУЧВАНИЯ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА КИНЕМАТИЧЕН МОДЕЛ НА СИСТЕМА ЗА МОНИТОРИНГ И РАННО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ОТ ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ В УСЛОВИЯТА НА „АСАРЕЛ ЕАД”

**Иван Парушев, Бойко Рангелов**

*Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, branguelov@gmail.com*

**РЕЗЮМЕ.** Проведени са предварителни проучвания свързани с изработването на кинематичен модел на система за мониторинг и ранно предупреждение от земетресение за обектите на Асарел ЕАД. Отчетени са най-опасните сеизмични огнища на територията на страната и извън нея. Определени са разстоянията до тях, времената на пробегата на Р и S вълните, както и разликите във тези времена. Подобна методика дава възможност за сигнализация при ставачо земетресение, базирана на основната идея за разполагане в максимална близост на датчици до всяко сеизмично огнище. Поради високата скорост на предаване на информация, първичните Р вълни служат за сигнализация за идващите по-късно S вълни, които са с драстично по-големи амплитуди и носят основния разрушителен потенциал.

**Ключови думи:** Ранно предупреждение, земетресения, Асарел-Медет

### INITIAL RESEARCH OF THE KINEMATIC MODEL OF A SYSTEM FOR MONITORING AND SEISMIC EARLY WARNING FOR "ASAREL" LTD

**Ivan Parushev, Boyko Rangelov**

*University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, branguelov@gmail.com*

**ABSTRACT.** Initial research to the creative kinematic model for a monitoring and seismic early warning system for the sites of the Asarel Ltd., is performed. The model is based to the consideration of the most dangerous seismic sources located on the country's territory and outside. The distances of the seismic sources to the site of Asarel Ltd are calculated. The P-waves and S-waves travel times are modeled as well and the preliminary results are obtained. The idea is based on the principle to install a seismic device nearest to each seismic source. This device can be triggered by the P-waves and the system starts work and signalize for the earthquake occurrence. The most destructive secondary S-waves are traveling slower, thus giving the time for any preventive measures.

**Key words:** Early warning, earthquakes, Asarel-Medet

### Въведение

Системите за сеизмичен мониторинг и ранно предупреждение се основават на една фундаментална физическа характеристика на сеизмичните вълни – различната скорост на първичните (P) и вторичните (S) вълни (Ranguelov, B. 2011). Теоретично, още в средата на XVIII век, физиците достигат до теоретичната обосновка, че в твърдите тела съществуват два вида обемни (защото се разпространяват в целия обем на твърдите тела) вълни – наречени са първични (от английското Primary) и вторични (от английското Secondary) вълни. Те се разпространяват с различна скорост, като „теоретичното им отношение” е равно на „корен от 2”. Имат и други особености – обикновено първичните вълни (при преминаването им през твърдата среда частичките на средата трептят по посока на разпространението на лъча на вълната) имат значително по-малки амплитуди и по-високи честоти, като често ги наричат „сигнални”. Пристигащите след тях вторични вълни (при тях частичките на средата трептят перпендикулярно на лъчите на разпространение на вълните) имат 3-4 пъти по големи амплитуди и по-ниски честоти. Тези им свойства, правят вторичните обемни

вълни (наричани „разрушителни”) най-разрушителната компонента на сеизмичните вълни, разпространяващи се при всяко земетресение (Ranguelov, 2011). Поради тези съображения системите за ранно предупреждение от земетресения използват първичните вълни като първи и най-важен сигнал, че след няколко секунди ще се появят по-разрушителните и по-опасни вторични вълни. Тези няколко секунди са основното преимущество на сеизмичните системи за ранно предупреждение. През това време (разликата във времената на пристигане на първичните и по-опасните вторични вълни) могат да се извършат редица полезни действия: автоматично изключване на различни опасни съоръжения – АЕЦ, бързи влакове, опасни производства, далекопроводи, газопроводи и други системи на инфраструктурата, както и да се подаде сигнал към гражданите и управленските структури. Понастоящем в света съществува една единствена работеща система за ранно предупреждение и тя е в експлоатация от 2007 г. в Япония. Системата струва няколко милиарда йени и покрива цялата територия на Япония. Тя доказва своята висока ефективност при земетресението от 11 март 2011 г. Тогава бяха изключени всички АЕЦ, скоростните влакове „Шинкансен”, химическите рафинерии, газопроводите и

други опасни компоненти на японската инфраструктура (Рангелов, 2012). В резултат, щетите от земетресението (особено вторичните) бяха сведени до минимум. Важно е да се отбележи, че преди въвеждането на системата в експлоатация, около пет години е протичало обучение на цялото население на Япония, за това, как действа тази система, какви се нейните възможности и как населението да се ползва от сигналите, излъчвани от нея. Става дума за най-развитата в електронно отношение страна, където неграмотността е ликвидирана още в началото на XX век. Това е съществен фактор при изграждане и функциониране на подобни системи за ранно предупреждение от природни бедствия. Тези системи са немислими в японския си вариант в слабо развитите страни. Например в Индонезия, където голяма част от населението е неграмотно, комуникациите са на ниска ниво, а хората вярват само на казаното от ходжата. В момента САЩ въвеждат подобна на японската система в Калифорния. В Европа мониторинговите системи са инсталирани в такива застрашени от земетръс градове, като Букурещ и Истанбул (Ranguelov, 2013).

### Кинематични и динамични сеизмични системи за ранно предупреждение и мониторинг – теоретични основи

Едно от най-силните оръжия на науката сеизмология, при изграждането на системи за ранно предупреждение от земетресения, е моделирането на очакваните явления и процеси в многосценарийни варианти. Има два основи подхода, които се съчетават в оптимално действие при издаването на ранните предупреждение (Ranguelov, 2014a, Рангелов, 2014б):

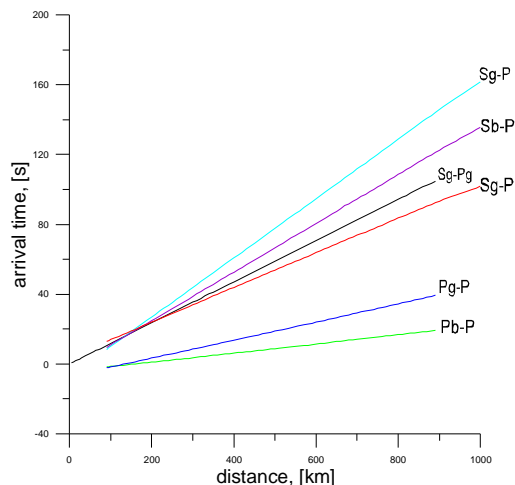
- Кинематични модели. Те се основават на разликата в скоростите на първичните и вторични сеизмични вълни, за които стана дума по-горе. Тези системи „стартират“ (реагират) при регистриран сигнал, т.е. първична сеизмична вълна, генерирана от дадено земетръсно огнище и с достатъчно голяма амплитуда (дискриминационното ниво е така подбрано, че системата да реагира само на опасни сеизмични въздействия в епицентралната зона). Тригериращото ниво е така подбрано, че да дава минимум „лъжливи тревоги“, т.е. системата да се включва и сигнализира, когато амплитудата на първичната вълна, достигнала до най-близката от земетръсното огнище сеизмична станция, е достатъчно голяма, за да се очакват поражения. Това задейства цялата система от станции и сигналните устройства, свързани с тях. Тогава времето за реакция се измерва с разликата от време в началото на процеса и предварително изчислените времена за пробег на вторичните вълни от огнището до застрашените обекти.
- Динамични модели. Те се основават както на разликата в скоростите на пробег на сеизмичните вълни, така и в очакваните амплитуди на разрушителната част от колебанията, регистрирани от системата. Тези системи са по-усъвършенствани, защото предварително изчислените сценарии, могат да отсеят местата, които са най-застрашени. Ефективността им практически не зависи от местоположението на сеизмичното огнище, а дава информация за всички

места (площи, области), където сеизмичното въздействие може да достигне опасни размери, в зависимост от епицентралното разстояние. Често тези системи използват единична тригерираща станция, която сама автоматично определя местоположението на епицентъра и след това подава сигнал до всички станции на системата, които реагират според предварително моделираните сценарии на очакваните опасни сеизмични въздействия. Този вид системи използват т.н. „матрица на решението“. Тя може да разграничава степента на опасност от очакваните силни сеизмични въздействия в реално време, т.е. може да ги класифицира като „силна, средна или слаба“ сеизмичната опасност и т.н. Тези системи изключват важни инфраструктурни обекти, като АЕЦ, бързоходни влакове, спират и затварят метростанции, мостове и други застрашени от вторични аварии обекти (химически заводи произвеждащи опасни химикали, рафинерии, газопроводи и т.н). Тези системи излъчват и съобщения по средствата за масова информация, GSM мрежите и др. комуникационни средства, както например е в Япония.

Уравнението:

$$V_p/V_s = 2^{1/2} \quad (1)$$

е фундаменталната връзка, върху която функционират кинематичните системи за ранно предупреждение. Зависимостта е свойство за всяка идеална еластична среда. Често в земната кора стойността е по-малка заради не идеалната еластичност на земната среда. Ходографът е функция, която представя зависимостта между времената на пробег на различните вълнови фази (S, P, Sg, Pg, Sb, Pb и др.) и разстоянието до сеизмичния източник. Функцията  $F(d, t_p, t_s)$  често е права линия, зависеща от скоростта на сеизмичните вълни в определения слой. Това е основната използвана функция за изчисляването на кинематичния модел (Ranguelov, Iliev, 2013, Parushev, Ranguelov, 2014). Основният принцип изисква по-дълго време за разпространение от сеизмичния източник до застрашената територия, което означава по-голямо разстояние. Времевата разлика ( $t_s - t_p$ ) се нарича предупредително време и представлява разликата между пристигането на P и S вълните до застрашения обект. Тези времена са предварително табулирани (ходографи на Джефрис Булен) и са представени на фигура 1.



Фиг. 1. Ходографи на различни сеизмични вълнови фази – по таблицата на Джефрис-Булен

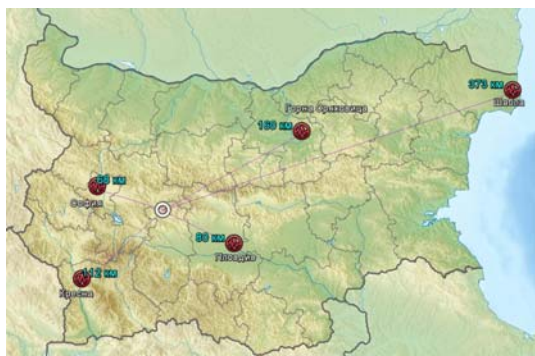
## Кинематичен модел на системата за мониторинг и ранно предупреждение за района на Асарел

Този модел се основава на презумпцията, че Р и S вълните, пътуват от всеки сеизмичен източник на страната до обектите на Асарел. Сеизмичните източници са очертани по принципа на конструкцията на сеизмичната карта на България (Ranguelov, 2015, Parushev, et al., 2015). Моделът взема предвид всички познати случаи за територията на България, които са представени опростено като геометрични точки на сеизмичните източници (фиг. 2,3,4,5).

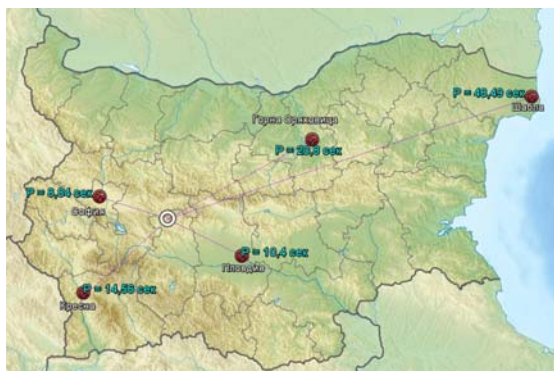
### Алгоритъм на функционирането

Използват се следните съображения преди инсталирането на апаратурата (Kalurachchi et al., 2014):

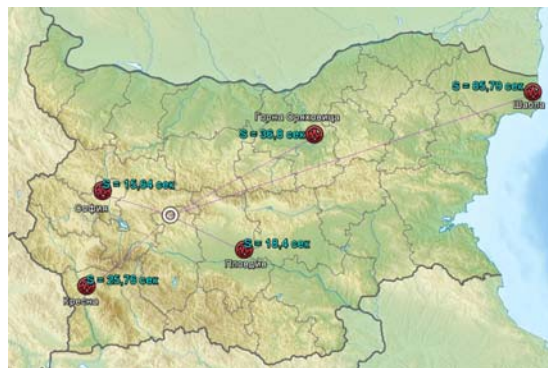
1. Избирането на локацията на всяка станция трябва да бъде съобразено с географското разположение на сеизмичните източници;
2. Трансформиране на разстоянията във времена с помощта на ходографи;
3. Използването на Р вълните за сигнализация и за стартиране на цялата система;
4. Оптимизация на сеизмичните станции:
  - А. Пускащите станции на системата се подбират в най-близката точка до епицентъра;
  - Б. Използват се станции на еднакви разстояния от източника;
  - В. Периферните станции за засичане на земетръсни събития извън България, също са предвидени.



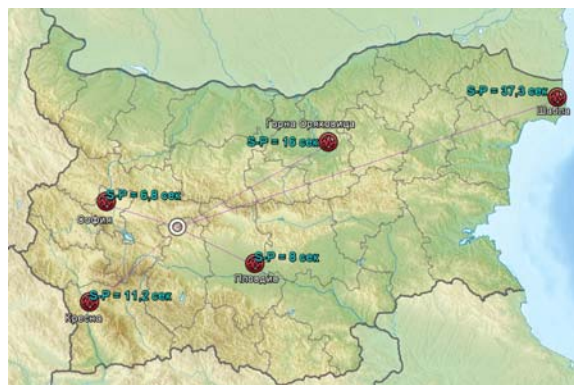
Фиг. 2. Основни сеизмични източници в България и разстояние до Асарел



Фиг. 3. Основни сеизмични източници в България и времена на пробег за Р вълни до Асарел



Фиг. 4. Основни сеизмични източници в България и времена на пробег за S вълни до Асарел



Фиг. 5. Основни сеизмични източници в България и времена на разлики за S-P вълни до Асарел

В общи линии, стъпките на разработка следват принципа на придобиване на информация за земетръсното събитие, колкото се може по-скоро след възникването му. Тъй като скоростта на сеизмичните вълни е от порядъка на km/s, то е от значение, сеизмичният сензор да бъде в най-близката точка до епицентъра. Стъпките, които биват задействани при засечени опасни нива на колебанията, генерирани от сеизмичните източници, са следните:

1. Р вълните сигнализират за събитие и задействат цялата мрежа;
2. Моделиране на вълновото поле на разпространение и посоката на движение на сеизмичния фронт се получава чрез последователно задействане на сеизмичните устройства;
3. Избиране на предварително изчислен сценарий, който е свързан с матрицата на вземане на решение;
4. Моделиране на времето за пристигащите S вълни и въвеждане на близки (червени), средни (оранжеви) и далечни (зелени) зони;
5. Вземане на решение – предварително изработване на матрица на решенията;
6. Излъчване на предупредителни сигнали за населението, администрациите и защитните институции;
7. Комбинирано предупреждение в случай на едновременно действие на няколко фактора (земетресение, цунами, свлачище и др.);
8. Изпращането на сигнал може да се осъществи по няколко канала – SMS, E-mail съобщение, сигнал за пейджър, TV, радио емисия, по звуков или светлинен път и др.;
9. Прекъсване на предупредителния сигнал след преминаване на събитието.

За изпълнението на този алгоритъм, най-важното е инсталирането на устройствата, възможно най-близо до сеизмичния източник. Това трябва да е специализирано устройство, което да сигнализира появата на земетръс. Анализът на получените стойности и графичното представяне на резултатите от моделирането, показват висока ефективност при сигнализация, поради кратките времена на пробег на сеизмичните вълни. В международната практика в такива случаи, се търси компромисно решение между ниската точност за локация на сеизмичния източник и краткото време за сигнализация. Смята се, че ефективността на подобни системи се диктува точно от краткото време за сигнализация. По-добре е незабавна сигнализация, отколкото загуба на време за по-точна локализация на сеизмичния източник (задача, която обикновено се решава от националните сеизмологични мрежи на страните, но изисква много повече време за намиране на решението – т.е. локализирането на източника и определянето на силата на земетресението). Често тази разлика в компромиса време/точност достига десетки и стотици пъти. Смята се, че е по-добре управленските органи да са сигнализираны, че в района на локалната мониторингова мрежа за силни движения става земетресение (което неизбежно е в района на мрежата), за да могат да имат възможно най-бърза реакция по спасяване и ограничаване на вторичните последици от силно земетресение. Изчакването на пълна и по-подробна информация за точното местоположение и силата на земетръса, дадени от националните мрежи, изисква повече време и ограничава способността за бърза и незабавна реакция. Това е най-важно условие в подобни бедствени ситуации по отношение на предприемането на незабавни спасителни мерки за гражданите и инфраструктурата.

При подобна конфигурация на източника на сеизмични вълни (земетресението) и регистриращите и сигнализиращи устройства, се налага системата за мониторинг да работи в мрежа. В нея задействането на една-единствена станция с ниво на тригериране, установено да реагира на достатъчно силно земно ускорение, трябва да стартира работата на цялата система. Така ще се избегне даването на „фалшиви“ тревоги и ще се повиши регистриращият капацитет за мониторинг на силните земни движения предизвикани от местно земетресение.

## Изводи и заключение

Кинематичният модел за сеизмичен мониторинг и ранно предупреждение за района на Асарел е създаден по оригинална методика, използвайки времето на пробег на сеизмичните S и P вълни, възможни да бъдат излъчени от българските сеизмични огнища. Моделът е предварителен и покрива основните сеизмично активни зони в България. Изчисленията на моделите могат да се използват от местните власти и други институции за развитието на сеизмични мониторингови и системи за ранно предупреждение за защита на обектите на Асарел-Медет и тяхната инфраструктура, както и за работещите в тези обекти в случай на земетресения, където и да е на територията на България.

Моделите за времето на пробег на сеизмичните вълни, показват относително висока ефективност системата.

Дадени са основните алгоритми за функционирането на специализирана система за сеизмичен мониторинг и ранно предупреждение. Подобна система може да бъде мултиплицирана за всички обекти на миннодобивната и енергийна инфраструктура на България.

## Литература

- Рангелов, Б. 2012. *Разгневената Земя – природните бедствия*, С., Изд. БАН, 294 с.
- Рангелов, Б. 2014. Системите за ранно предупреждение от природни бедствия – все по-актуални. СГО, с. 60-63. ISSN 1312-5605.
- Kalurachchi, Y., M. Indirli, B. Rangelov, F. Romagnoli. 2014. The ANDROID Case Study; Venice and its Territory: Existing Mitigation Options and Challenges for the Future, *Procedia Economics and Finance* 18 ( 2014 ) 815 – 824 © 2014 Published by Elsevier B.V. doi: 10.1016/S2212-5671(14)01007-7. Proc. 4th Int. Conf. on Building Resilience, Building Resilience 2014, 8-10 September 2014, Salford Quays, United Kingdom
- Rangelov, B. 2011. *Natural Hazards – nonlinearities and assessment*, Sofia, Acad. Publ. House (BAS), 327 p.
- Rangelov, B. 2013. Initial steps to the early warning systems in Bulgaria – earthquakes, tsunamis, marine hazards, *Geophysical Res. Abst.*, 15, EGU2013-8239.
- Rangelov, B. 2014a. Early warnings – Bulgarian experience in case of time deficit systems (earthquakes and tsunamis), *Proc. 5th Intl. Conf. Cartography and GIS*, vol.2. 15-20th June., Riviera, Bulgaria. p. 738-745.
- Rangelov, B. 2014b. Early warning systems for earthquakes and tsunamis – a global innovation. Bulgarian experience. *Proc. 1st Intl. Conf. "Innovative behavior, entrepreneurship and sustainable development."* Sofia, 28-29 June, Publ. house - ZNANIE, p.257-278, ISBN 978-954-621-247-4.
- Rangelov, B., T. Iliev. 2013. Geography aspects of the monitoring and early warning seismic system in Bulgaria., *Proc. 3rd Intl. Geography Symp.*, 10-13 June, Kemer, Turkey, 287.
- Rangelov, B. 2015. Historical Disasters Data Extraction and a Modern Marine Geohazards Early Warning System in the Area of the North Bulgarian Black Sea Coast., *Proc. FIG Working Week 2015 "From the Wisdom of the Ages to the Challenges of the Modern World"*, Sofia, Bulgaria, 17-21 May 2015., pp. 1-9. [https://www.fig.net/resources/proceedings/fig\\_proceedings/fig2015/techprog.htm](https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2015/techprog.htm)
- Parushev, I, B. Rangelov, 2014. General principles of the kinematic models used in early warning systems – earthquakes and tsunamis (Venice case), *Ann. of M&G University, Vol. 57, Part I, Geology and Geophysics.*, p. 95-100. ISSN 1312-1820
- Parushev, I., B. Rangelov, T. Iliev, E. Spasov. 2015. Kinematic modeling of idealized system for early registration and warning in case of an earthquake., *Proc. 7th BgGS National Conference With International Participation "GEOPHYSICS 2015"* pp. 1-8. (on CD).

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Приложна геофизика“.