

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34

DOI: 10.54503/0321-1339-2022.122.3-207

**Дж. К. Карапетян, А. С. Гаспарян, С. Р. Шахпаронян,
Г. М. Матевосян, Р. К. Карапетян, А. С. Шахпаронян**

Сейсмический датчик для систем мониторинга. Разработка и результаты

(Представлено чл.-кор. НАН РА С. М. Оганесяном 4/IX 2022)

Ключевые слова: *землетрясение, сейсмический сигнал, портативный сейсмический датчик, сейсмоприемник, спектральный анализ.*

Введение. Задача повышения качества массовых сейсмологических наблюдений решается путем оснащения наблюдательных сейсмометрических и инженерно-сейсмометрических пунктов и станций приборами нового поколения. Это дает возможность проведения на высоком уровне мониторинга (регистрация и анализ землетрясений, микроземлетрясений и т.д.) урбанизированных территорий, особо значимых объектов, зданий и сооружений [1-6]. Модели сейсмологических приборов, разработанные и изготовленные до 1990-х гг., уже не справляются с возросшими к ним требованиями. За последние годы обновилась элементная база электронных компонент, появились новые возможности информационных технологий и усовершенствованных конструкций, в том числе механических элементов подвеса вертикальных и горизонтальных сейсмометров [7-16]. В Институте геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова НАН РА (ИГИС НАН РА) проводятся работы по модернизации существующих сейсмометров и созданию армянских отечественных, значительно более дешевых уникальных сейсмических приборов, имеющих относительно простые конструкции и способных заменить дорогостоящие зарубежные аналоги.

Короткопериодный сейсмический датчик. В 1975 г. В. А. Токмаковым был разработан сейсмоприемник СМ-3, до сих пор широко используемый как в сейсмологических, так и инженерных исследованиях. Сейсмоприемник СМ-3 предназначен для преобразования механических колебаний в колебания электрического тока и может использоваться для изме-

рения вертикальных и горизонтальных колебаний в различных системах. СМ-3 имеет плавную настройку собственной частоты до 0.5 Гц, термокомпенсатор для вертикального варианта сейсмометра и обладает возможностью несложной перестройки с вертикального на горизонтальный вариант и обратно [17]. Согласно некоторым американским источникам сейсмоприемник СМ-3 используется в качестве эталона для калибровки сейсмических инструментов [18]. Основными недостатками сейсмоприемника СМ-3 являются: большой вес, большие габаритные размеры, трудности регулировки при эксплуатации, нестабильность нулевого положения, низкий коэффициент затухания собственных колебаний маятника.

Авторами настоящей работы обобщен опыт лучших отечественных разработок, проанализированы достижения и проблемы современной сейсмометрии и создан наиболее экономически целесообразный новый сейсмоприемник – модернизация СМ-3. Цель модернизации – уменьшение веса, увеличение коэффициента затухания, упрощение конструкции, улучшение эксплуатационных характеристик, обеспечение стабильности нулевого положения прибора.

Вес СМ-3 составляет 7.7 кг. Он содержит более 30 высокоточных деталей, изготовление которых требует высококвалифицированной рабочей силы и специальной оснастки, в то время как модернизированная версия прибора, получившая название IGES-006, весит менее 1 кг и содержит менее 10 деталей, для изготовления которых не требуется никаких специальных высокоточных производств.

При эксплуатации СМ-3 в полевых условиях возникают следующие неудобства: для настройки прибора необходимо открывать крышку, разарретировать, устанавливать нулевое положение маятника и снова закрывать крышку. После закрывания крышки через некоторое время меняется температура внутри прибора, что приводит к изменению нулевого положения маятника. В связи с этим возникает необходимость неоднократной повторной корректировки. При использовании прибора в составе сети, состоящей из множества датчиков, процесс настройки становится трудоемким, изнурительным и требует много времени. У модернизированного датчика IGES-006 улучшены эксплуатационные характеристики. Разарретирование и установка маятника в нулевое положение производятся без открывания крышки прибора.

Разработанный сейсмометр предназначен для модернизации существующих национальных сетей сейсмологических и инженерно-сейсмометрических наблюдений как на территории Армении, так и за рубежом [3]. Датчик размещен в корпусе, в котором установлены колеблющийся маятник с инерционной массой и катушка, расположенная на одной оси с инерционной массой. Датчик имеет также магнит, расположенный на корпусе соосно катушке, и медный сердечник. Конструктивно сейсмоприемник представляет собой маятник инерционного типа с собственным периодом, регулируемым до 3 с.

Сейсмоприемник помещается в герметичный корпус с выходным разъемом для соединения с блоком регистрации. Разработаны три варианта сейсмоприемника: с периодами собственных колебаний маятника 1.0, 1.5 и 2.5 с. Коэффициент затухания маятников критический. Установка маятника в нулевое положение производится без вскрытия крышки прибора. Инерционные массы и катушка уравновешены относительно оси колебания маятника, что дает возможность отказаться от применения спиральных пружин. Это, в свою очередь, исключает температурную нестабильность сейсмического датчика. У сейсмометра СМ-3 с изменением температуры маятник меняет положение своего равновесия, так как при изменении температуры жесткость пружины в основном меняется вследствие изменения ее упругих свойств [17].

Для выяснения термостабильности сейсмоприемника СМ-3 и модернизированного датчика IGES-006 проведены совместные лабораторные температурные испытания. При температуре +50°С смещение маятника СМ-3 составляло 10 мм, у IGES-006 смещения маятника не наблюдалось. Необходимость использования пружин для установки маятника в нулевое положение отпадает.

Основные характеристики сейсмометра IGES-006 приведены в табл. 1.

Таблица 1

№	Характеристика	Размерность	Значения
1	Рабочий частотный диапазон	Гц	0.3–50
2	Неравномерность амплитудно-частотной характеристики в рабочем диапазоне частот	дБ	±3
3	Номинальный коэффициент преобразования	в с/м	30
4	Затухание	-	1
5	Габариты сейсмоприемника (одна компонента)	Мм	70×70×60
6	Вес одного сейсмоприемника, не более	Кг	0.5
7	Габариты блока контроля	Мм	205×150×70
8	Масса блока контроля	Кг	1.1
9	Рабочий температурный диапазон	С	-30...+50
10	Относительная влажность при температуре окружающего воздуха 25°С		80%

Результаты измерений в режиме сейсмического мониторинга. IGES-006 успешно прошел лабораторные и полевые испытания и был рекомендован для тестового использования в режиме мониторинга, в частности, на станциях региональных сейсмических сетей в районах с повышенной сейсмической опасностью.

Для тестирования в режиме мониторинга в период с 30 сентября по 2 октября 2019 г. в Республике Северная Осетия-Алания (Российская Федерация) датчик IGES-006 был установлен на двух сейсмостанциях с цифровыми блоками управления (во Владикавказе и в поселке Кармадон), которые входят в сейсмическую сеть Геофизического института ВНИИ РАН. После установки сейсмоприемников IGES-006 в районе Западного Кавказа 24.10.2019 г. произошло землетрясение со следующими очаговыми параметрами: 2019-10-24 15:41:41, широта 43.12, долгота 44.57, глубина 15 км, mb: 3.4/4, которое было зарегистрировано приборами СПВ-3К и IGES-006, установленными на станциях «Владикавказ» и «Кармадон». На рис. 1 и 2 приведены записи горизонтальной компоненты X и соответствующие спектры волновых форм землетрясения 24.10.2019 г., записанные приборами IGES-006 (а) и СПВ-3К (б).

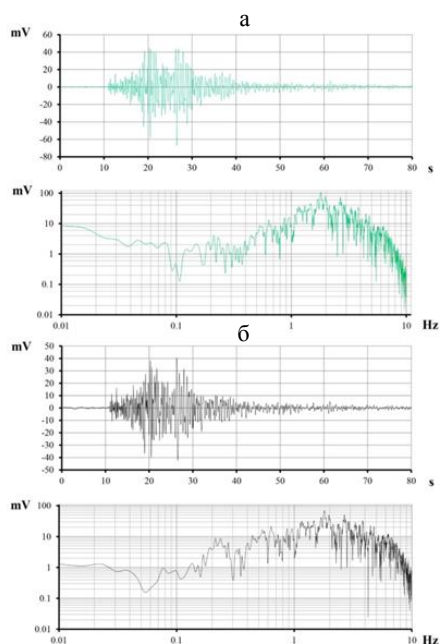


Рис. 1. Записи горизонтальной компоненты X землетрясения 24.10.2019 г. на станции «Кармадон» и соответствующие спектры волновых форм: а – IGES-006, б – СПВ-3К.

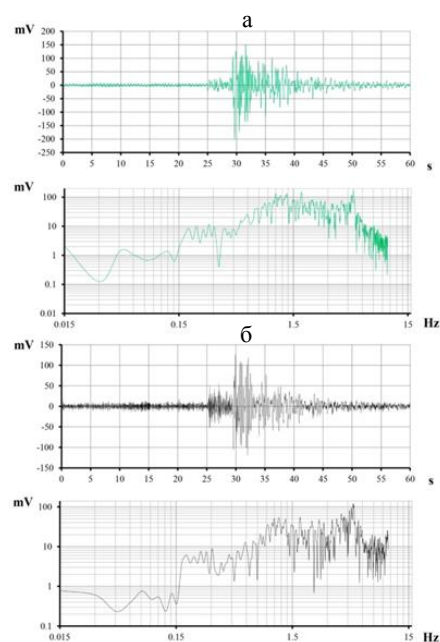


Рис. 2. Записи горизонтальной компоненты X землетрясения 24.10.2019 г. на станции «Владикавказ» и соответствующие спектры волновых форм: а – IGES-006, б – СПВ-3К.

Сравнительный анализ показывает, что наблюдается хорошее соответствие волновых форм и спектров записей с датчиков IGES-006 и СПВ-3К, однако первое вступление волновых форм более ярко выделяется на записи IGES-006 (рис. 1, 2). На записи СПВ-3К наблюдаются повышенные

(примерно в 2 раза) амплитуды фона, которые можно интерпретировать как аппаратный шум (рис. 2). Значения преобладающих периодов в общем случае совпадают: $T=0.37$ с и $T=0.55$ с (рис. 1 – записи землетрясения станцией «Кармадон» и соответствующие спектры волновых форм). Значения преобладающих периодов на спектрах датчиков IGES-006 и СПВ-3К также совпадают: $T=0.20$ с и $T=0.57$ с (рис. 2 – записи землетрясения станцией «Владикавказ» и соответствующие спектры волновых форм). Однако есть некоторые различия при сравнении спектральных плотностей (рис. 1, 2).

Для демонстрации соответствия записей землетрясения на рис. 3, 4 приведены сопоставления волновых форм и соответствующих спектров с сейсмометров IGES-006 и СПВ-3К на станциях «Кармадон» и «Владикавказ».

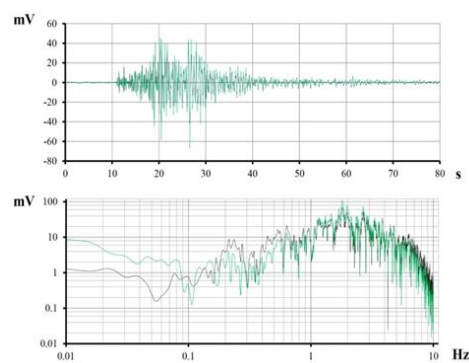


Рис. 3. Сопоставление волновых форм и спектров записей с сейсмометров IGES-006 и СПВ-3К на станции «Кармадон»,

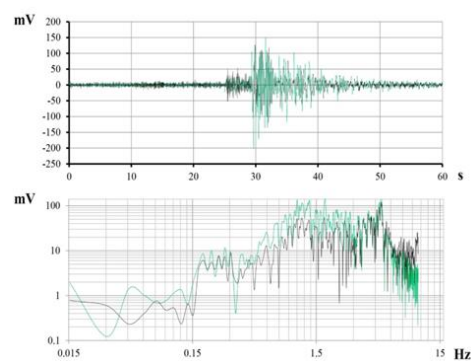


Рис. 4. Сопоставление волновых форм и спектров записей с сейсмометров IGES-006 и СПВ-3К на станции «Владикавказ».

Сопоставительный анализ показывает хорошее соответствие волновых форм и по времени, и по амплитуде. Однако есть некоторые различия амплитудных значений, которые, по-видимому, связаны с разной чувствительностью сейсмоприемников IGES-006 и СПВ-3К (рис. 3, 4).

В табл. 2 приведены количественные параметры (Peak Ground Velocity-PGV) колебаний грунта (с записей сейсмометров IGES-006 и СПВ-3К), а также рассчитаны некоторые интегральные (Velocity Spectrum Intensity-VSI, Cumulative Absolute Velocity-CAV) параметры как более стабильные энергетические параметры сейсмического воздействия [19, 20].

Сравнительная оценка параметров из табл. 2 показывает, что на записях IGES-006 максимальные амплитуды по сравнению со значениями на записях прибора СПВ-3К в 1.59 раза больше (станции «Кармадон» и «Владикавказ»). Это, по-видимому, связано с разной чувствительностью приборов.

Таблица 2

	«Кармадон»		«Владикавказ»	
	IGES-006	СПВ-3К	IGES-006	СПВ-3К
T_1	0.5554	0.5554	0.5699	0.5749
ω_1	1.8005	1.8005	1.7548	1.7395
T_2	0.3745	0.3745	0.1998	0.2004
ω_2	2.6703	2.6703	5.0049	4.9896
PGV	66.9337	42.1953	201.9528	126.5613
ASI	59.4310	45.5519	171.7707	117.4456
CAV	365159.0086	278974.9051	706490.0571	531466.8229

На расстоянии 22 км от эпицентра максимальная амплитуда на записи IGES-006 станции «Кармадон» составляет 66.9 мВ, а на записи IGES-006 станции «Владикавказ» – 201.9 мВ, т.е. в 3 раза меньше. При этом отношение эпицентральных расстояний станций «Владикавказ» и «Кармадон» равно 2.4. Отношение значений интегральных параметров, в частности CAV, составляет 1.9. Те же значения получились при сравнении соответствующих параметров на записи СПВ-3К станций «Кармадон» и «Владикавказ». Отношения значений интегральных параметров, в частности ASI, которое описывает спектральный состав, рассчитанных по записям СПВ-3К и IGES-006, составляют, соответственно, 2.6 и 2.9. Т. е. при изменении расстояния в 2.4 раза максимальная амплитуда меняется в 3 раза, а параметр CAV меняется в 1.9 раза, что более правдоподобно, поскольку CAV учитывает не только волновую форму, но и длительность записи и, по сути, представляет собой энергетический параметр и ведет себя более стабильно. На рис. 5 и 7 представлены микросейсмы перед землетрясением на станциях «Кармадон» и «Владикавказ» и соответствующие спектры.

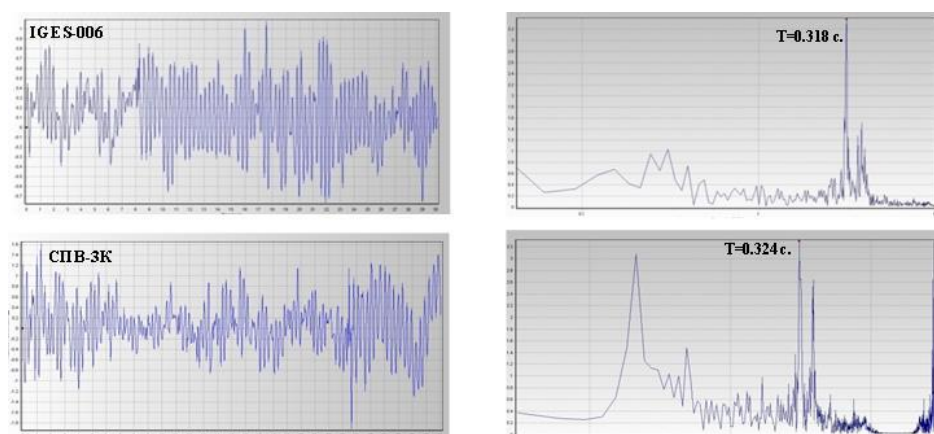


Рис. 5. Микросейсмы перед землетрясением, записанные на станциях «Кармадон», и их соответствующие спектры.

Микросейсмы после землетрясения, записанные на станциях «Кармадон» и «Владикавказ» и соответствующие спектры представлены на рис. 6 и 8.

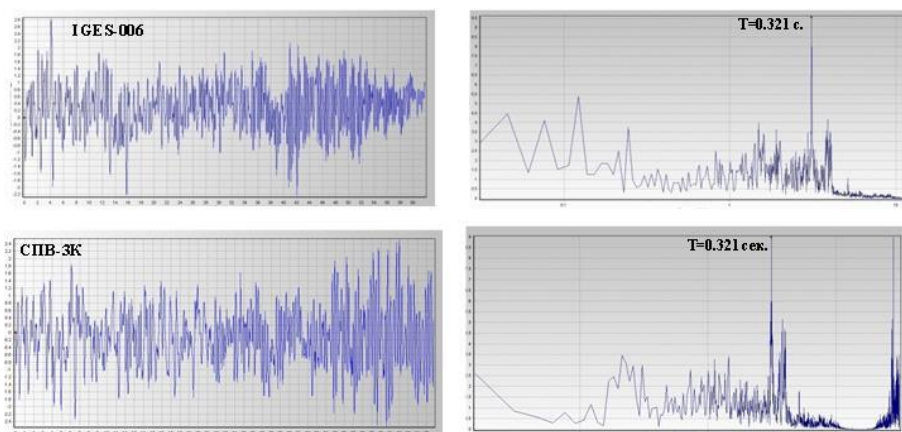


Рис. 6. Микросейсмы после землетрясения, записанные на станции «Кармадон», и их соответствующие спектры.

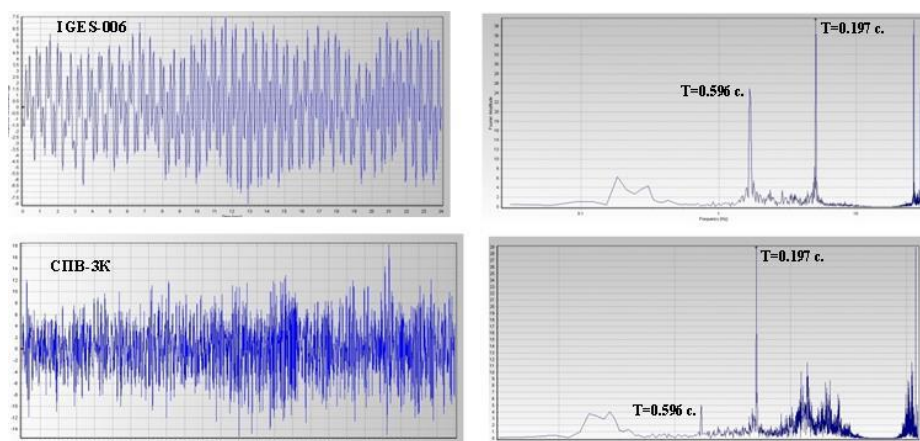


Рис. 7. Микросейсмы перед землетрясением, записанные на станции «Владикавказ», и их соответствующие спектры.

Анализ спектров микросейсм до и после землетрясений показывает, что значения преобладающих периодов на спектрах датчиков IGES-006 и СПВ-3К в основном совпадают – $T=0.32$ с на станции «Кармадон», $T=0.197$ с на станции «Владикавказ», однако на спектрах микросейсм датчика IGES-006 наблюдается ярко выраженный пик при периоде $T=0.596$ с, который и виден на спектре микросейсм датчика СПВ-3К до землетрясения.

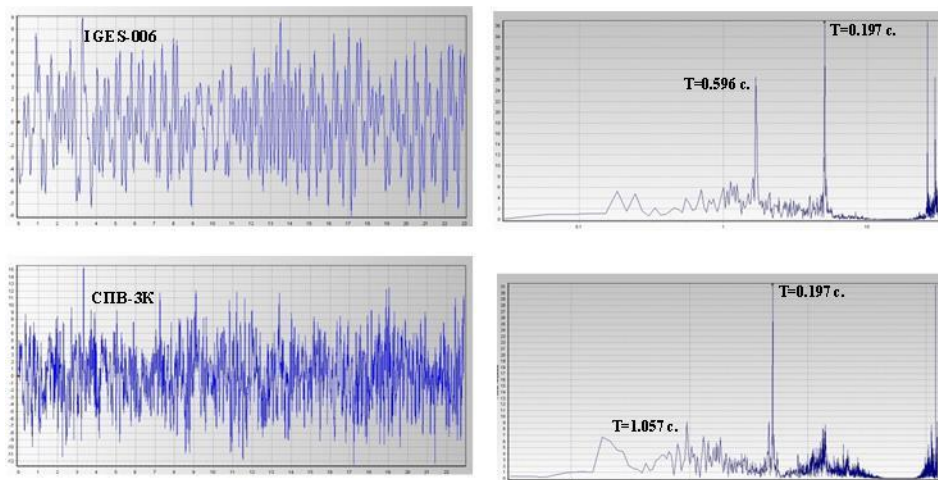


Рис. 8. Микросейсмы после землетрясения, записанные на станции «Владикавказ» и их соответствующие спектры.

При сравнении волновых форм микросейсм и их спектров до и после землетрясения на станциях «Кармадон» и «Владикавказ» наблюдается некоторая закономерность по изменениям амплитудного состава (рис. 5-8), в частности, после землетрясений наблюдаются сравнительно повышенные значения спектральных амплитуд.

Из табл. 2 видно, что во всех случаях на спектрах наблюдается преобладающий период 0.56 с, который, по-видимому, является основным характерным периодом данного землетрясения. Для подтверждения результатов в дальнейшем по мере накопления большого количества микросейсм землетрясений имеет смысл исследовать микросейсмы до и после основного толчка землетрясения.

Вывод. Разработан малогабаритный датчик для систем мониторинга, отвечающий самым высоким современным требованиям – короткопериодный сейсмодатчик с периодами собственных колебаний маятника 1.0, 1.5 и 2.5 с. Его амплитудно-частотная характеристика соответствует велосиметру и имеет максимально плоский участок в полосе 0.3-50 Гц. Макет сейсмодатчика успешно прошел лабораторные и полевые испытания, в том числе и в режиме сейсмического мониторинга.

Проведенные совместные испытания портативных сейсмодатчиков IGES-006 и СПВ-3К свидетельствуют о хорошей согласованности характеристик сейсмического процесса, зарегистрированных независимо обоими приборами.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что малогабаритные короткопериодные сейсмоприемники могут заменить крупногабаритные и более дорогие датчики.

Реализованные технологии обеспечивают более дешевую альтернативу для развития средств массовых сейсмических наблюдений в Армении

по сравнению с существующими зарубежными программами модернизации сетей сейсмического мониторинга.

Разработанный авторами компактный короткопериодный сейсмометр IGES-006 предназначен для модернизации сейсмологических и инженерно-сейсмометрических наблюдений, региональных и локальных геодинамических исследований, регистрации сейсмических событий на земной поверхности.

Внедрение прибора в практику сейсмических наблюдений позволит:

1. обеспечить независимость отечественных исследований от зарубежных поставок;
2. поднять уровень отечественного геофизического приборостроения;
3. сэкономить средства на импортозамещении;
4. участвовать в международных проектах по модернизации мировой глобальной сети сейсмических наблюдений.

Авторы выражают благодарность руководству Геофизического института – филиалу Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук» (ГФИ ВНИЦ РАН) за предоставленную возможность размещения приборов на станциях «Владикавказ» и «Кармадон».

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке Республики Армения в рамках научных проектов № АСН-01/22, 21SCG-1E021.

Институт геофизики и инженерной сейсмологии
им. А. Назарова НАН РА
e-mail: iges@sci.am

**Дж. К. Карапетян, А. С. Гаспарян, С. Р. Шахпаронян,
Г. М. Матевосян, Р. К. Карапетян, А. С. Шахпаронян**

Сейсмический датчик для систем мониторинга. Разработка и результаты

Представлен разработанный в Институте геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова НАН РА сейсмический короткопериодный датчик IGES-006. Датчик предназначен для использования как в составе различных систем сейсмического мониторинга, так и для решения специальных инженерных задач. Макет датчика успешно прошел лабораторные и полевые испытания, в том числе в режиме сейсмического мониторинга. Проведен сравнительный анализ сейсмических сигналов, зарегистрированных с использованием датчиков IGES-006 и СПВ-3К, во временной и частотной областях.

**Ջ. Կ. Կարապետյան, Ա. Ս. Գասպարյան, Ս. Ռ. Շահպարոնյան,
Գ. Մ. Մաթևոսյան, Ռ. Կ. Կարապետյան, Հ. Ս. Շահպարոնյան**

**Սեյսմիկ տվիչ մշտադիտարկման համակարգերի համար:
Մշակում և արդյունքներ**

Ներկայացված է ՀՀ ԳԱԱ Ա. Նազարովի անվ. երկրաֆիզիկայի և ինժեներային սեյսմաբանության ինստիտուտի կողմից մշակված ճոճանակային IGES-006 սեյսմիկ տվիչը: Տվիչը նախատեսված է ինչպես երկրաշարժերի մշտադիտարկման, այնպես էլ տարբեր ոլորտներում վիբրոչափումների իրականացման համար: Սեյսմիկ տվիչը հաջողությամբ անցել է ինչպես լաբորատոր, այնպես էլ դաշտային փորձարկումներ, այդ թվում նաև փորձարկումներ մշտադիտարկման պայմաններում: Անցկացվել է IGES-006 և SPV-3K տվիչների օգտագործմամբ ժամանակային և հաճախական ոլորտներում ստացված սեյսմիկ ազդանշանների համեմատական վերլուծություն:

**J. K. Karapetyan, A. S. Gasparyan, S. R. Shakhparonyan,
G. M. Matevosyan, R. K. Karapetyan, H. S. Shakhparonyan**

**Seismic Sensor for Monitoring Systems.
Development and Results**

The short-period seismic sensor IGES-006 developed at the NAS RA Institute of Geophysics and Engineering Seismology after A. Nazarov is presented. The IGES-006 sensor can be used both as part of various seismic monitoring systems and for solving special engineering problems. The sensor prototype has successfully passed laboratory and field tests, including the seismic monitoring mode. A comparative analysis of seismic signals recorded using IGES-006 and sensors in the time and frequency domains have been carried out.

Литература

1. Dzeboev B. A., Soloviev A. A., Dzeranov B. V. *et al.* – Russian Journal of Earth Sciences (RJES). 2019. V. 19. ES6005. DOI: 10.2205/2019ES000691.
2. Ismail-Zadeh A., Adamia S., Chabukiani A. *et al.* – Earth Sci. Rev. 2020. 10.1016/j.earscirev.2020.103222.
3. Karapetyan J.K., Li Li - Acta Geologica Sinica (English Edition), 95(supp. 1): 55–58. 2021, <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14831>.
4. Karapetyan J. K., Sargsyan R. S., Ghazaryan K. S. *et al.* – Russian Journal of Earth Sciences. 2020. V. 20. DOI:10.2205/2020ES000709.
5. Karapetyan J. K. – Geoinformatics Research Papers. V. 5. BS1002, <https://doi.org/10.2205/CODATA2017>, 2017 102 of 172.
6. Karapetyan J. K. 2018. In: Proc. of International Conference for the Decade Memory of the Wenchuan Earthquake with The 4th International Conference on Continental Earthquakes (The 4th ICCE) and The 12th General Assembly of

- the Asian Seismological, May 12-14, 2018, Chengdu, Sichuan, China, the 4th ICCE-0000000904. 2018. P. 908-916
7. *Васильев И. М., Кожевников Ю. П., Матвеев И. В. и др.* – Наука и технологические разработки. 2016. Т. 95. № 4. С. 5-10. DOI: 10.21455/std2016.4-1.
 8. *Рыков А. В.* – Физика Земли. М. Наука, 1992. С.76-80.
 9. *Рыков А. В.* – Сейсмические приборы. 2002. Вып. 37, 24-37.
 10. *Саркисян В. К.* – Изв. НАН Армении. Техн. науки. 2010. Т. 63, № 3. С.313-318.
 11. *Саркисян Р. Е.* – Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 3. С. 39-41.
 12. *Сидорин А. Я.* – Сейсмические приборы. 2018. Т. 54. № 4. С. 77-80.
 13. *Karapetyan J.* In: Book of Abstracts of the 36th General Assembly of the European Seismological Commission Sebastiano D'Amico. Galea P., Bozionelos G., Colica E. et al. (Eds.). 2-7 September 2018 I Valletta- Malta. 2018. ESC2018-S2-926.
 14. *Karapetyan J. K.* In: American Geophysical Union, AGU100, Washington D.C., 10-14 Dec 2018, S13C-0459.
 15. *Karapetyan J. K., Karapetyan R. K.* In: American Geophysical Union, AGU100, San Francisco CA, 9-13 December 2019, S41G-0604.
 16. *Karapetyan J., Gasparyan A.* In: 30 years after the Spitak earthquake: experience and perspectives. International conference. December 03-07, 2018, Yerevan, Armenia. Conf. program, Abstracts volume. P. 67-68.
 17. *Токмаков В. А.* – Сейсмические приборы. 1975. Вып. 8. С. 14-18.
 18. *Mackey K., Burk D., Chalyu K.* In: The proceedings of scientific works of the conference is dedicated to the 70th Anniversary of National Academy of Sciences. 2013. P. 73-77.
 19. *Григорян В. Г., Карапетян Дж. К.* – Строительная механика и расчет сооружений. 2008. № 3. С. 59-63.
 20. *Карапетян Дж. К.* – Вопросы инженерной сейсмологии. 2012. Т. 39. № 3. С. 33-40.