

УДК 550.34.034

© С. И. Сергеев, С. А. Королёв, С. Г. Волосов, О. П. Кузнецов

РАЗВИТИЕ МАЛОАПЕРТУРНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ "МИХНЕВО" ДЛЯ РЕШЕНИЯ НОВЫХ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

В настоящей работе рассматриваются направления развития малоапертурной сейсмической группы "Михнево" для решения новых сейсмологических задач, в том числе корреляционного анализа в реальном масштабе времени. Описываются сейсморегистратор ССД-3, специально разработанный для работы в составе сейсмической группы, а также алгоритм работы новой автоматизированной системы сбора, обработки и представления информации от сейсмической группы "Михнево".

Кл. сл.: малоапертурная сейсмическая антенна, когерентная сейсмическая группа, Михнево, землетрясение, автоматизированная система, сейсморегистратор, регулируемый направленный прием, корреляционный анализ

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАЗВИТИЯ

Уникальная научная установка (УНУ) "Малоапертурная сейсмическая антенна "Михнево" была создана в Институте динамики геосфер РАН (ИДГ РАН) с целью проведения сейсмологических исследований, использующих технологии когерентных сейсмических групп с малой апертурой. Как известно, основное отличие сейсмической группы от сейсмостанции с одним пунктом наблюдения заключается в повышении чувствительности благодаря улучшению отношения сигнал/шум, что в свою очередь достигается когерентным суммированием сигналов от группы сейсмоприемников методом регулируемого направленного приема (РНП).

Наша уникальная научная установка расположена в 80 км к югу от Москвы на территории одноименной геофизической обсерватории ИДГ РАН и занимает площадь 1 км². Малоапертурная сейсмическая антенна (МСА) состоит из нескольких сейсмоприемников, расположенных на концентрических окружностях радиусами 130, 320 и 600 м. В состав УНУ также входит центр обработки данных, размещенный там же — в геофизической обсерватории "Михнево".

За время, прошедшее с момента создания малоапертурной сейсмической антенны "Михнево", достигнуты значительные результаты в области мониторинга и локации сейсмических событий на территории Восточно-Европейской платформы с нижним порогом регистрируемой магнитуды от 0.1.

Успешная эксплуатация УНУ на протяжении 12 лет позволила отработать методы обнаружения

сверхслабых сейсмических событий и найти подходы к решению новых задач сейсмологического мониторинга, в том числе:

- корреляционное автоматическое обнаружение сверхслабых сейсмических событий из заранее созданного каталога эталонных волновых форм в реальном масштабе времени;

- автоматическое обнаружение и определение параметров сейсмических событий методом регулируемого направленного приема в реальном масштабе времени;

- разработка технологии создания автоматических постоянно действующих МСА, осуществляющих сейсмический контроль территорий вблизи ответственных объектов в реальном масштабе времени;

- детальное инструментальное исследование сейсмогенерирующих структур.

Развитие малоапертурной сейсмической антенны "Михнево" производится с целью создания автоматизированной системы, способной решать все вышеперечисленные задачи. Для достижения поставленной цели ведутся работы по следующим направлениям:

- увеличение количества сейсмоприемников с целью повышения чувствительности и расширяющей способности сейсмической антенны;

- установка новых сейсморегистраторов, разработанных в ИДГ РАН специально для совместной работы в составе МСА и обеспечивающих непрерывное поддержание высокой когерентности приема;

Технические характеристики сейсморегистратора ССД-3

Характеристика	Значение
Число каналов регистрации	3
Разрядность АЦП	24
Тип входа	Дифференциальный
Частота дискретизации, Гц	200
Число карт памяти	2
Напряжение питания, В	12
Потребляемая мощность, Вт	2.5

– разработка нового комплекса программного обеспечения приема, хранения и обработки информации, функционирующего в автоматическом и автоматизированном режимах в реальном масштабе времени и осуществляющего сохранение накопленных данных сейсмического мониторинга в международных форматах MiniSEED и CSS.

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ СЕЙСМОРЕГИСТРАТОР ССД-3

Работа сейсмической антенны в режиме регулируемого направленного приема с высокой разрешающей способностью по азимуту предъявляет высокие требования к синхронизации сейсмических записей датчиков в группе в сочетании с точностью привязки времени в группе к всемирному координированному времени (Universal Time Coordinated, UTC). В ИДГ РАН был специально разработан сейсморегистратор ССД-3 для работы в составе сейсмической группы. К числу его отличительных особенностей можно отнести параллельную работу всех каналов аналого-цифрового преобразования и синхронную привязку начала серии отсчетов по всем каналам к ежесекундной метке точного времени [1]. Технические характеристики сейсморегистратора ССД-3 и его внешний вид показаны в таблице и на рис. 1. Связь с центром обработки данных в составе осуществляется по интерфейсу RS-485. Копия данных сохраняется в кольцевом буфере на базе двух карт памяти типа SD с возможностью горячей замены. Сейсморегистратор ССД-3 может быть использован не только в режиме непрерывной передачи данных в центр обработки данных, но в полностью автономном режиме — как в составе группы, так и самостоятельно.



Рис. 1. Сейсморегистратор ССД-3

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ОТ МСА

Необходимо отдельно остановиться на таком направлении, как обнаружение сверхслабых сейсмических событий на основе корреляционного анализа [2]. Методика данного вида исследований предусматривает большой объем вычислений, что требует высокой степени автоматизации процессов сбора, обработки и представления информации, полученной от сейсморегистраторов. Для этого разрабатывается комплекс программного обеспечения, схема работы которого представлена на рис. 2. Алгоритм работы этого комплекса заключается в следующем.

1. ПО непрерывного приема данных от сейсморегистраторов группы "Михнево" осуществляет прием потока и запись принятых данных на диск ЭВМ в виде файлов без какой-либо обработки, "как есть". В результате работы данного ПО образуются т. н. мультифайлы данных.

2. Появление файлов записей в международных форматах MiniSEED и CSS сопровождается записью информации о них в Базу данных файлов записей (каталог с привязкой ко времени и каналам). Это необходимо для работы программного обеспечения сейсмической обработки, а также для эксплуатации системы.

3. После того как файлы записей сформированы, осуществляется передача содержащихся в них данных по запросу с использованием ПО сервера

потокowego вещания Seedlink — предполагается рассмотреть использование компонентов существующего ПО.

4. Для корректного формирования файлов используется условно-постоянная информация из базы данных с характеристиками каждого датчика-велосиметра и сейсморегистратора, с географическими координатами (абсолютными и относительными по отношению к центру группы), с частотой дискретизации, с коэффициентами преобразования, с параметрами АЧХ датчика и т. д.

5. После того как файлы записей сформированы, производится сейсмологическая обработка. В данном алгоритме представлены три возможные ветви: а) полностью автоматическая обработка

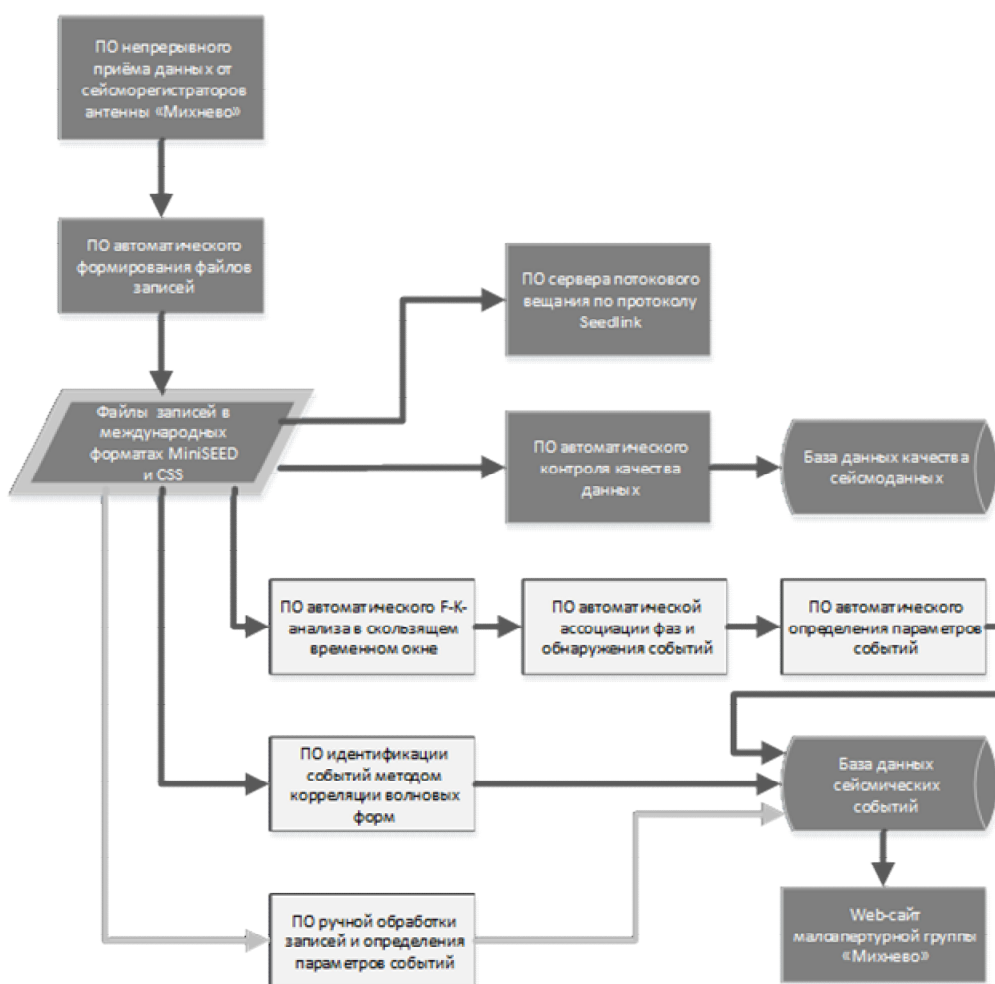


Рис. 2. Схема обработки данных в автоматизированной системе МСА "Михнево"

на базе F-K-анализа (базирующаяся на библиотеке ObsPy [3–5]); б) ручная обработка в ПО ручной обработки записей и определения параметров событий; в) ПО идентификации событий методом корреляции волновых форм.

6. ПО автоматического F-K-анализа в скользящем временном окне запускается периодически с заданным интервалом (не чаще, чем раз в минуту) и осуществляет стандартную процедуру F-K-анализа над данными, содержащимися в файлах записей с использованием информации о местоположении датчиков из Базы данных с характеристиками станций группы "Михнево". Результатом работы является распределение энергии сигнала по азимуту и медленности. Предполагается использование существующих библиотек ПО, например, ObsPy [3–5].

7. ПО автоматической ассоциации фаз и обнаружения событий и ПО автоматического определения параметров событий используют результаты F-K-анализа (координаты максимумов распределения энергии сигнала по азимуту и медленности) для ассоциации их с сейсмическими событиями, как Р- и S-вступлений; для определения расстояния до события; определения азимута на событие; для определения координат события; возможно, для определения глубины по перебору годографов — и в итоге производится занесение информации о событии в базу данных событий. Предполагается использование существующих библиотек ПО, например, ObsPy [3–5].

8. Периодически производится запуск ПО автоматического контроля качества данных, которое должно выявлять каналы с аномальными амплитудами и аномальным уровнем высокочастотных составляющих.

ВЫВОДЫ

1. Развитие аппаратного обеспечения МСА "Михнево" позволит существенно увеличить чувствительность системы и сделает ее по-настоящему уникальным научным инструментом, позволяющим проводить сейсмологические исследования сверхслабых событий в европейской части России.

2. Развитие программного комплекса МСА "Михнево" сделает возможным полную автоматизацию сервисных функций, включая сохранение записей в форматах MiniSEED и CSS, признанных на международном уровне. Тем самым будет существенно облегчено взаимодействие с партнера-

ми при выполнении международных исследований.

3. Автоматизация функций обнаружения и определения параметров сейсмических событий открывает путь к отработке технологий построения отдельных сейсмических групп, контролирующих сейсмический режим вблизи ответственных объектов инфраструктуры и эксплуатируемых собственниками данных объектов.

4. В результате проведения работ по развитию МСА "Михнево" будет создан аппаратно-программный комплекс мирового уровня, ориентированный на решение широкого круга сейсмологических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волосов С.Г., Королев С.А., Солдатенков А.М. Система синхронизации записей станций малоапертурной сейсмической антенны "Михнево" // Сейсмические приборы. 2012. Т. 48, № 1. С. 26–34.
2. Адушкин В.В., Китов И.О., Нестеркина М.А., Константиновская Н.Л., Санина И.А., Непеина К.С. Обнаружение сверхслабых сигналов на малоапертурной сейсмической антенне "Михнево" с помощью кросс-корреляции волновых форм // ДАН. 2015. Т. 460, № 6. С. 707–709.
3. Beyreuther M., Barsch R., Krischer L., Megies T., Behr Y., Wassermann J. ObsPy: A Python toolbox for seismology // SRL. 2010. Vol. 81, no. 3. P. 530–533. Doi: 10.1785/gssrl.81.3.530.
4. Megies T., Beyreuther M., Barsch R., Krischer L., Wassermann J. ObsPy — What can it do for data centers and observatories? // Annals of Geophysics. 2011. Vol. 54, no. 1. P. 47–58.
5. Krischer L., Megies T., Barsch R., Beyreuther M., Lecocq T., Caudron C., Wassermann J. ObsPy: a bridge for seismology into the scientific Python ecosystem // Computational Science & Discovery. 2015. Vol. 8, no. 1. 014003. Doi: 10.1088/1749-4699/8/1/014003.

Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, Россия

Контакты: *Сергеев Сергей Ильич*,
sergio68moscow@live.ru

Материал поступил в редакцию: 15.12.2016

A FURTHER DEVELOPMENT OF THE MIKHNEVO SMALL APERTURE SEISMIC ARRAY FOR NEW SEISMOLOGICAL STUDIES

S. I. Sergeev, S. A. Korolyov, S. A. Volosov, O. P. Kuznetsov

Institute of Geosphere Dynamics of RAS (IDG RAS), Moscow, Russia

This paper describes a further development of the Mikhnevo small-aperture seismic array of IDG RAS for new seismological studies including seismic event detection with real time cross-correlation analysis, detailed research of seismogenic zones with low seismic emission, development of always-on automated seismic monitoring system for critical infrastructure facilities, automated real time frequency-wavenumber-analysis. The new SSD-3 seismic digitizer is presented in this paper has been developing specially for small aperture seismic arrays. This 24-bit digitizer has 3 differential inputs and provides high precision time synchronization of data acquisition needed for coherency of small aperture seismic array. The algorithm of automated full featured seismic data processing system for the Mikhnevo small-aperture seismic array are also describing. This algorithm combines different types of detection, identification and location of seismic events including frequency-wavenumber-analysis, phase association and cross-correlation analysis. It also provides real time transmission with de facto world standard Seedlink protocol.

Keywords: small-aperture seismic array, coherent seismic array, Mikhnevo, earthquake, computer-aided system, seismic digitizer, seismic trace stacking, cross-correlation analysis

REFERENCES

1. Volosov S.G., Korolyov S.A., Soldatenkov A.M. [System of synchronization of records of stations of the low-aperture seismic antenna "Mikhnevo"]. *Seismicheskie pribory* [Seismic instruments], 2012, vol. 48, no. 1, pp. 26–34. (In Russ.).
2. Adushkin V.V., Kitov I.O., Nesterkina M.A., Konstantinovskaya N.L., Sanina I.A., Nepeina K.S. [Detection of superweak signals on the low-aperture seismic Mikhnevo antenna by means of cross-correlation of wave forms]. *DAN* [Transactions (doklady) of the Russian Academy of Sciences], 2015, vol. 460, no. 6, pp. 707–709. (In Russ.).
3. Beyreuther M., Barsch R., Krischer L., Megies T., Behr Y., Wassermann J. ObsPy: A Python toolbox for seismology. *SRL*, 2010, vol. 81, no. 3, pp. 530–533. Doi: 10.1785/gssrl.81.3.530.
4. Megies T., Beyreuther M., Barsch R., Krischer L., Wassermann J. ObsPy — What can it do for data centers and observatories? *Annals of Geophysics*, 2011, vol. 54, no. 1, pp. 47–58.
5. Krischer L., Megies T., Barsch R., Beyreuther M., Lecocq T., Caudron C., Wassermann J. ObsPy: a bridge for seismology into the scientific Python ecosystem. *Computational Science & Discovery*, 2015, vol. 8, no. 1, 014003. Doi: 10.1088/1749-4699/8/1/014003.

Contacts: *Sergeev Sergey Il'ich*,
sergio68moscow@live.ru

Article received in edition: 15.12.2016