**Возможность применения экспериментальной сейсмостанции и нейросетей для изучения вулканической активности**

***Рябинкин К.С.[1,2], Насыров В.В.[2], Фролов В.И.[1], Губин С.В.[2], Римлянд В.И.[2]***

**The possibility of using experimental seismic stations and neural networks to study volcanic activity**

***Ryabinkin K.S., Nasyrov V.V., Frolov V.I., Gubin S.V., Rimlyand V.I.***

*[1] Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;*
*e-mail: kostya-rowan@mail.ru*
*[2] Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск;*
*e-mail: 000612@togudv.ru*

В работе описан опыт применения экспериментальной сейсмостанции и нейросетевых алгоритмов, созданных для мониторинга сейсмичности. В результате испытаний разработанная система продемонстрировала пригодность для расширения возможностей имеющихся сетей мониторинга сейсмичности и для использования при создании новых сетей ВМАК.

**Введение**

Камчатка – регион с высокой сейсмической и вулканической активностью, представляющей значительную угрозу для населения и инфраструктуры. Согласно сейсмическим картам ОСР-2016 [6], большая часть полуострова расположена в зоне 8-10-балльных землетрясений с периодичностью около 500 лет.

Сейсмические станции играют важнейшую роль в мониторинге вулканической и тектонической активности. Одной из проблем остается нехватка постоянных пунктов наблюдений в регионе, что приводит к утрате важной информации для прогнозирования катастроф. Потенциал существующей сети сейсмических станций имеет очевидные ограничения, а ручная или полуавтоматическая обработка сигналов не позволяет анализировать постоянно увеличивающийся объем поступающих данных. Одним из возможных решений данной проблемы является разработка и широкое внедрение недорогих автономных сейсмостанций. В ИВиС ДВО РАН ведется разработка прибора «СейсмоПро» – автономной сейсмостанции на базе микрокомпьютера и геофонов. Простота эксплуатации и относительно невысокая стоимость «СейсмоПро» обеспечивают получение данных необходимого качества для сейсмического мониторинга. Для автоматизированной обработки большого потока сейсмических данных ведутся работы по созданию нейросети.

Цель исследования – испытания разработанного прибора в условиях извержения вулкана Шивелуч и сравнение возможностей записи сейсмических сигналов прототипом станции «СейсмоПро» с данными, полученными широкополосными станциями известных производителей. Задачи включают проверку надежности прибора в сложных полевых условиях, выделение сейсмических событий в полученных данных с помощью нейросети, обработку полученных данных и анализ характеристик экспериментального устройства. Результаты исследования позволят оценить потенциал использования «СейсмоПро» для расширения сети мониторинга вулканической активности на Камчатке и нейросети для автоматизированного поиска сейсмических событий.

**Испытательный полигон**

Испытания сейсмостанции «СейсмоПро» были приурочены к извержению вулкана Шивелуч на севере Камчатки в августе-сентябре 2024 г.

14 августа 2024 г., по данным сейсмических наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН, появились первые предвестники предстоящего извержения вулкана Шивелуч. В последующие дни происходило непрерывное нарастание количества событий III и IV типов. Если 14 августа количество таких событий исчислялось единицами, то к 17 августа значимые сейсмические события происходили по несколько раз в час.

17 августа 2024 г., около 19:00 по камчатскому времени, в районе экструзивного купола Каран на западном склоне вулкана Шивелуч возникла мощная парогазовая колонна, к которой постепенно начал примешиваться выносимый пепел темного цвета; появился пепловый шлейф. Около 22:00 случилось первое эксплозивное событие. К 23:00 парогазовая активность сменилась эксплозивной деятельностью с выносом большого количества ювенильного материала, выдавливанием лавы и выбросом вулканических бомб – пароксизмальное событие. Визуально пирокластические потоки на склонах отсутствовали. Пепловая колонна поднялась на высоту 9 км н.у.м. В ночные часы извержение сопровождалось свечением в районе купола и высокоинтенсивными электростатическими разрядами как в районе купола, так и на протяжении первых километров пеплового шлейфа. Раскаты грома были слышны на расстоянии 12-15 км от активного центра. Визуально было определено, что в области извержения активны по меньшей мере два эксплозивных центра в районе куполов Каран и 300 лет РАН. Длина шлейфа составила не менее 450 км.

Эксперимент начался 18 августа 2024 г. В радиусе 15 км от вулкана Шивелуч были установлены два временных пункта наблюдений: в районе каньона реки Байдарная и в районе реки Кабеку, также постоянный пункт был установлен в поселке Ключи, на вулканостанции ИВиС ДВО РАН. В эксперименте сравнивались сейсмические записи сейсмостанций «СейсмоПро» с записями широкополосных станций Lennartz, выступавших в качестве эталона. Каждая пара станций была установлена на одно основание.

**Материалы и методы**

Сейсмостанция «СейсмоПро» включает две составляющие: датчик-геофон и регистратор. В качестве датчиков применяются геофоны с резонансной частотой 4.5 Гц. Сейсмостанция «СейсмоПро» предусматривает использование трех геофонов, расположенных под прямыми углами друг к другу, для регистрации трех компонент сейсмического сигнала (X, Y, Z). Возможности применения геофонов для мониторинга локальных землетрясений обсуждаются в научных исследованиях [1, 2, 4]. Регистратор является уникальной разработкой на основе микрокомпьютера «Искра».

Обработанный в регистраторе сигнал от датчиков записывается на карту памяти и передается на сервер в режиме реального времени. Для обеспечения корректного взаимодействия всех компонентов используются стандартные протоколы SPI и UART. Специально разработанное программное обеспечение для микроконтроллера обеспечивает надежную и стабильную работу всей системы [3, 5].

Выбор оптимальной конфигурации системы сейсмического мониторинга определяется конкретными задачами исследования и техническими характеристиками приборов. В таблице приведены сравнительные характеристики усредненной широкополосной станции и разработанной нами сейсмостанции «СейсмоПро».

Таблица. Сравнение характеристик широкополосного сейсмометра и «СейсмоПро»

| № п/п | Характеристики | Широкополосная сейсмостанция | «СейсмоПро» |
|---|---|---|---|
| 1 | Эффективный частотный диапазон | 0.01-50 Гц | 3-100 Гц |
| 2 | Средний уровень шума относительно модели низкого шума (2-40 Гц) | 20 дБ | 30 дБ |
| 3 | Максимальная частота дискретизации | 1000 Гц | 1000 Гц |
| 4 | Энергопотребление | 2.2 Вт | 0.5 Вт |
| 5 | Вес | 3.5 кг | 1 кг |
| 6 | Цена | 2 000 000 руб. | 70 000 руб. |

**Применение нейросети для поиска землетрясений**

Мониторинг вулканической и тектонической сейсмичности требует обработки больших объемов данных сейсмостанций. Ручной анализ неэффективен из-за высокой частоты дискретизации (≥100 Гц) и сложности выделения слабых сигналов. Для решения этой проблемы была разработана глубокая нейронная сеть с механизмами внимания для распознавания паттернов в зашумленных сигналах.

Нейронная сеть, реализованная на TensorFlow, обучена на датасете STEAD (1.2 млн записей) [7, 8]. Эксперименты подтвердили ее способность к автоматическому анализу данных как с широкополосных станций, так и с «СейсмоПро».

При обработке данных с извержения вулкана Шивелуч нейронная сеть успешно детектировала землетрясения, что иллюстрируется вероятностными кривыми событий и моментами прихода P- и S-волн (рис. 1). Валидация проводилась на данных STEAD и сравнением с алгоритмами STA/LTA, подтверждая совпадение числа обнаруженных событий. Все результаты были проверены вручную для оценки качества работы нейронной сети.

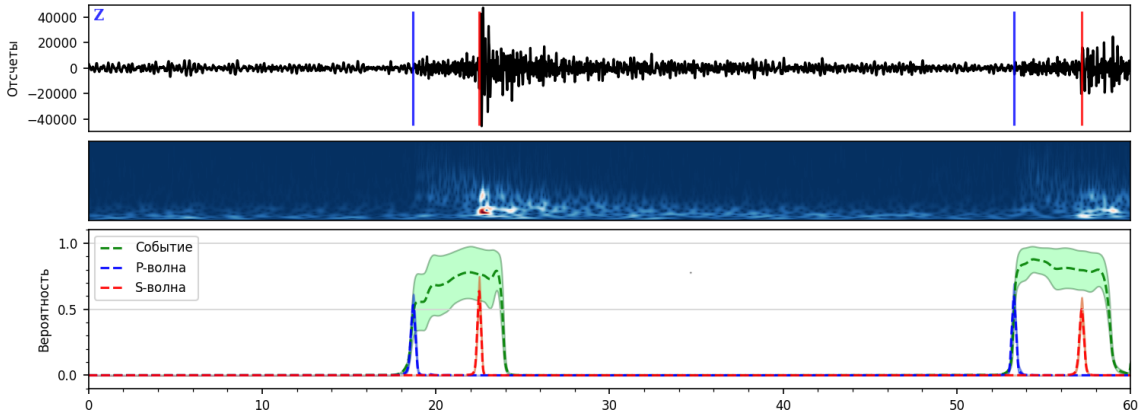


Рис. 1. Пример минутной сейсмической записи с извержения вулкана Шивелуч со станции «СейсмоПро», на которой нейросеть нашла два землетрясения и определила их P- и S-волны.

**Результаты и анализ эксперимента**

Визуальное сравнение волновых форм широкополосной сейсмостанции и «СейсмоПро» показало расхождения на низких частотах. Однако, времена прихода P- и S-волн соответствовали друг другу, фазовые сдвиги отсутствуют. После фильтрации 3-15 Гц сходимость сигналов повысилась (рис. 2).

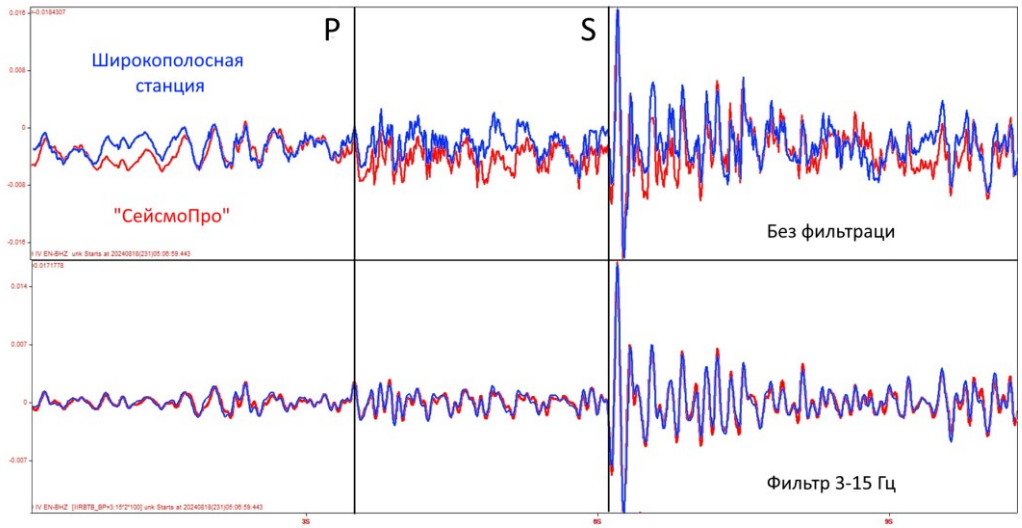


Рис. 2. Наложение волновых форм с широкополосной сейсмической станции и с «СейсмоПро».

Сходимость сигналов свидетельствует о том, что качество записи, полученное с помощью «СейсмоПро», позволяет точно определять времена прихода продольных и поперечных волн, необходимые для вычисления гипоцентральных и эпицентральных расстояний очаговой зоны. Данные также позволяют оценивать амплитуды колебаний и другие параметры, необходимые для расчета магнитуды и других ключевых параметров исследуемых событий. Важно подчеркнуть, что результаты испытаний «СейсмоПро» не указывают на отсутствие полезной информации за пределами указанного диапазона. Причины расхождений на высоких частотах были рассмотрены ранее, а расхождения на частотах ниже 3 Гц могут быть объяснены повышенным уровнем собственных шумов используемых геофонов.

**Выводы**

В ходе испытаний сейсмостанция «СейсмоПро» продемонстрировала высокую корреляцию данных с эталонным широкополосным сейсмометром Lennartz 3DLite MkIII в частотном диапазоне 3-15 Гц. Сейсмостанция «СейсмоПро» может эффективно применяться для уплотнения существующих сетей сейсмических наблюдений в сочетании с широкополосными станциями в составе ВМАК (вулканологических многопараметрических автоматизированных комплексов). Низкая стоимость и неприхотливость в эксплуатации делают ее привлекательной для расширения сети мониторинга в условиях ограниченных ресурсов.

Были проведены испытания нейросетевого алгоритма для автоматизированного поиска землетрясений. Результаты показали высокую эффективность нейронной сети в обнаружении локальных сейсмических событий. Автоматизированная обработка позволит значительно сократить время анализа информации и улучшить качество мониторинга в целом.

В части обработки, интерпретации и обобщения результатов исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-20031 (https://rscf.ru/project/24-17-20031/) и Министерства образования и науки Хабаровского края (соглашение № 116С/2024). Работы по организации и проведению измерений выполнены в рамках государственного задания Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН по теме НИР № FWME-2024-0015 «Изучение механизмов извержения Авачинского вулкана и создание методик оценки вулканической опасности».

**Список литературы**

1. *Беляков А.С.* Магнитоупругие сенсоры и геофоны для векторных измерений в геоакустике // Акустический журнал. 2005. Т. 5. С. 53-65.
2. *Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Павлов Д.В. и др.* Инструментальные методы расширения амплитудно-частотной характеристики геофона // Сейсмические приборы. 2019. № 3. С. 5-23.
3. *Будченко А.А., Черепанов В.П.* Тестер геофона SGD-TG – повышение качества регистрации сейсмических данных и снижение стоимости сейсморазведочных работ // Приборы и системы разведочной геофизики. 2007. Т. 21. № 3. С. 26-33.
4. *Дергач П.А., Дучков А.А., Юшин В.И.* Использование геофонов в локальных сетях сейсмологического мониторинга // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. № 3. С. 140-146.
5. *Столяренко А.С.* Цифровая метеостанция на основе микроконтроллера Arduino // Техническое творчество молодежи. 2018. № 4. С. 34-37.
6. *Уломов В.И., Богданов М.И., Трифонов В.Г. и др.* Пояснительная записка к комплекту карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016 // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49-122.
7. *Vaswani A., Shazeer N., Parmar N. et al.* Attention Is All You Need // 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017). Long Beach, CA, USA. 2017. 11 p.
8. *Zhu W., Beroza G.C.* PhaseNet: A Deep-Neural-Network-Based Seismic Arrival Time Picking Method // Geophysical Journal International. 2019. V. 216. Is. 1. P. 261-273. https://doi.org/10.1093/gji/ggy423