

УДК 550.8.08

Цифровой сейсмический регистратор «Ермак–5». Пять лет развития

© 2021 г. П.Г. Бутырин^{1,2}

¹ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия; ²«ГИ УрО РАН», г. Пермь, Россия

Поступила в редакцию 19.08.2021 г.

Аннотация. Рассмотрены опубликованные сведения о нескольких известных сейсмических регистраторах, применяемых в современных системах сейсмологического мониторинга, выполнен их качественный сравнительный анализ. Приведены сведения о присутствии российских приборов этого класса в Государственном реестре средств измерения. Приведены ключевые технические характеристики регистратора «Ермак» и подтверждающие результаты лабораторных и полевых экспериментов. При этом особое внимание уделено соответствию амплитудно-частотных характеристик регистратора эталонным аналогам. Приведено краткое описание системы гибкого управления питанием модулей регистратора, которая предназначена для снижения потребляемой мощности. Минимальное значение потребляемой мощности составляет около 300 мВт при регистрации по шести каналам, что позволяет эффективно использовать прибор для проведения длительных измерений с применением автономных источников питания. Синхронизация внутренних часов регистратора производится с использованием систем GPS/GLONASS (сотни наносекунд) и служб NTP (десятки микросекунд). Эффективность эксплуатации обеспечивается наличием у регистратора графического дисплея, на котором кроме времени и параметрической информации выводятся волновые формы в различных режимах отображения. Также приведён список объектов, где проходили испытания или в настоящее время эксплуатируются сейсмические регистраторы серии «Ермак».

Ключевые слова: сейсмологический мониторинг, сейсмический регистратор, система сбора данных, синхронизация времени, автономная сейсмическая станция, широкополосный сейсмоприёмник, аналого-цифровой преобразователь, приёмник GPS, управление питанием.

Для цитирования: Бутырин П.Г. Цифровой сейсмический регистратор «Ермак-5». Пять лет развития // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 3. – С. 84–94. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.06>

Введение

Развитие микроэлектронной базы и доступность средств автоматизированного проектирования предоставляют широкий спектр решений для создания высокопроизводительных и надёжных систем мониторинга. Реализация таких проектов напоминает сборку из программно-аппаратного конструктора. Однако по-прежнему наиболее сложными задачами являются синхронность времени и снижение энергопотребления при сохранении функциональности. В России и за рубежом можно найти ряд компаний, специализирующихся на разработке цифровых сейсмических регистраторов.

В системах мониторинга восточной части России широко применяются регистраторы серии «Байкал» [Байкал-8 ..., 2021; Байкал-А ...,

2021]. Они хорошо зарекомендовали себя для применения на объектах мониторинга регионального и локального масштабов. На данный момент стабильными версиями приборов являются «Байкал-8» и «Байкал-А». Последний характеризуется крайне низким уровнем энергопотребления – 85 мВт, что делает его незаменимым для проведения автономных наблюдений.

Сейсмические регистраторы «Регистр» [Сенин и др., 2012] успешно применяются в сфере инженерных геофизических исследований. Приборы постоянно дорабатываются с учётом изменения технических условий [Сенин и др., 2017; Аппаратурные разработки ..., 2021].

Компания R-Sensors кроме сейсмических датчиков постоянно совершенствует регистраторы серии «NDAS» [Регистраторы ..., 2017].

Компания Z-Lab производит сейсмометры, оснащённые встроенным регистратором «ZET048». В приборе предусмотрена высокоточная система синхронизации времени на основе протокола PTP (Precision Time Protocol) [Система мониторинга ..., 2017]. Использование специфических средств синхронизации по проводным сетям передачи данных расширяет спектр мониторинговых задач — позволяет разворачивать системы сбора в подземных выработках.

Портативный сейсмический регистратор «Сейсар-5» [Матвеев, Матвеева, 2017] характеризуется низким энергопотреблением (0.35 Вт) и малыми значениями внутренних шумов. В публикации [Татевосян и др., 2018] говорится о том, что в 2018 г. приборы активно применялись в системах мониторинга, но широко не распространены.

Сейсмический регистратор «Апатит», выпускаемый компанией ООО ДСис [Апатит регистратор, 2020], отвечает современным техническим условиям для геофизической аппаратуры, включая встроенный аккумулятор и WiFi-модуль. Учитывая отзывы специалистов Кольского и Байкальского филиалов ФИЦ ЕГС РАН, можно отметить, что прибор имеет эргономические недостатки, недостаточное количество каналов и отсутствие автозапуска.

Значительное количество стационарных сейсмических станций оснащено оборудованием компаний Kinometrics (высоконадёжные сейсмические станции «Q-330»), Guralp и Nanometrix

[Разинков и др., 2019]. Оборудование указанных производителей демонстрирует высокую надёжность и точность синхронизации. Современные образцы регистраторов имеют низкую потребляемую мощность, малый размер и вес, а также развитый набор интерфейсов для управления и сбора данных.

Некоторые виды геофизических исследований не могут быть проведены без использования поверенных средств измерения (СИ). Для этого регистратор должен быть включён в Государственный реестр средств измерения (ГРСИ). В табл. 1 приведены записи из ГРСИ для сейсмических регистраторов и станций. Из таблицы видно, что из перечисленных выше приборов только «ZET048» и «Апатит» присутствуют в реестре.

Основные особенности развития и функционирования регистратора

Первые образцы приборов серии «Ермак» (рабочий проект «SeisView») проходили лабораторные и полевые испытания ещё в 2015 г. [Бутырин, 2015а; 2015б]. С тех пор прибор прошёл три этапа модернизации [Бутырин, 2017] и к настоящему времени достиг функционально-технологического максимума [Бутырин, 2018]. Данный материал носит обзорный характер и во многом повторяет развёрнутое описание регистратора, приведённое в журнале «Сейсмические приборы» [Бутырин и др., 2018]. Ряд публикаций содержит сведения о доработках,

Таблица 1. Сейсмические регистраторы и станции, внесённые в ГРСИ по данным на 2021 г.

Рег. номер	Наименование СИ	Тип СИ	Производитель	Страна
26176-03	Регистраторы сейсмические	MR/NCC2002	Syscom Instruments SA	Швейцария
48742-11	Регистраторы сейсмические цифровые многоканальные	ZET048	ООО «Электронные технологии и метрологические системы» (ЭТМС), г. Москва	Россия
56462-14	Регистраторы цифровые сейсмические	Reftek-130, Reftek-130B	Refraction Technology, Inc.	США
66760-17	Станции сейсмические	ДС.431410.40ТДЕ	Общество с ограниченной ответственностью «ДизайнСистемы» (ООО ДСис), г. Обнинск Калужской обл.	Россия
79842-20	Станции сейсмические	Апатит	ООО ДСис, г. Обнинск Калужской обл.	Россия
74737-19	Регистраторы сейсмические	Ермак-5	ООО «НПК Вулкан», г. Москва	Россия
80481-20	Регистраторы сейсмические MR2002SM24K	Нет данных	SYSCOM Instruments SA	Швейцария

касающихся повышения надёжности и расширения функционала [Бутырин, 2019], а также особенности применения регистраторов серии «Ермак» на различных объектах мониторинга [Шулаков и др., 2018].

В настоящее время регистратор «Ермак-5» позволяет выполнять:

- регистрацию сигналов с частотой дискретизации от 1 до 2000 Гц без потери эффективности разрядов дискретизации;
- автоматическую привязку времени при помощи GPS или NTP с постоянной коррекцией;
- запись данных на съёмный носитель в формате miniSEED;
- визуализацию волновых форм одного или трёх каналов одновременно при частоте дискретизации не более 1000 Гц;
- запись служебной и параметрической информации одновременно с потоком данных;
- передачу данных по DSL и Ethernet по протоколам SEEDLink и HTTP.

Табл. 2 содержит ключевые параметры некоторых упомянутых сейсмических регистраторов, включая «Ермак-5».

Каждый прибор проходит приёмочные испытания и, при необходимости, поверку с соответствующим сертификатом. В качестве эталонных приборов для тестирования использовался цифровой широкополосный трёхкомпонентный велосиметр Guralp CMG-40TDE, цифровые регистраторы REFTEK 130-01, к которым подключались нижеприведённые сейсмодатчики:

- велосиметры CMG-6T (производство Guralp, Великобритания);
- Seis-Monitor (1Hz) и Mini Seis-Monitor (2Hz) (производство Geospace Technologies, США);
- Sercel L-4C-3D (1Hz) (производство Sercel, США);

– CM-3KB (производство КБ «Геофизприбор», РФ);

– GS20DX (производство «Геоспейс Технолоджис Евразия», РФ);

– молекулярный датчик MTSS-1003 (производство R-Sensors, РФ).

На рис. 1 представлены спектры мощности смещений при одновременной регистрации различными типами сейсмических приборов в месте установки региональной сейсмостанции PR3R («Кунгур»), где комплекс приборов работал длительный промежуток времени [Сейсмологический мониторинг ..., 2017]. Красный цвет – Guralp CMG-40TDE. Синий и чёрный, соответственно, сейсмометры Geospace Seis-Monitor и CM-3KB (пассивные сейсмодатчики), подключённые к регистратору «Ермак-5». Как видно из рис. 1, спектры хорошо согласуются между собой.

Результаты обработки сигналов синхронных наблюдений при выполнении работ по сейсмическому микрорайонированию [Верхоланцев, 2017а; 2017б] приведены на рис. 2. Приведённые спектры мощности скоростей смещений для сейсмометров Guralp CMG-6T (активные сейсмодатчики), подключённых к регистраторам Reftek 130-01 (красная линия) и «Ермак-5» (синяя линия), указывают на соответствие характеристик регистратора «Ермак-5» теоретическим.

С учётом коэффициентов преобразования и уровня внутреннего шума ясно, что регистратор «Ермак-5» можно использовать для проведения всех видов сейсмологических исследований: непрерывного сейсмологического мониторинга, кратковременных наблюдений в широком диапазоне частот с активными и пассивными сейсмометрами.

Таблица 2. Функционально-технические особенности различных сейсмических регистраторов

	Reftek	Байкал-8	Апатит	Регистр	Сейсар-5	Guralp Minimus	Ермак-5
Количество каналов	6	6	3–18	3	3	4	1÷6
Диапазон частот дискретизации, Гц	10÷1000	100÷4000	10÷4000	нет данных	100	1 час÷5000	1÷2000
Потребляемая мощность, Вт	1	2	0.2	1	0.36	1.8	0.3÷2
Возможность синхронизации времени в шахте	да	нет	да	нет	нет	да	да
Динамический диапазон, дБ	130	130	134	120	130	136	120
Формат данных	PASSCAL	miniseed	miniseed	RAW	RAW	miniseed	miniseed
Визуализация данных	нет	нет	нет	нет	нет	нет	да

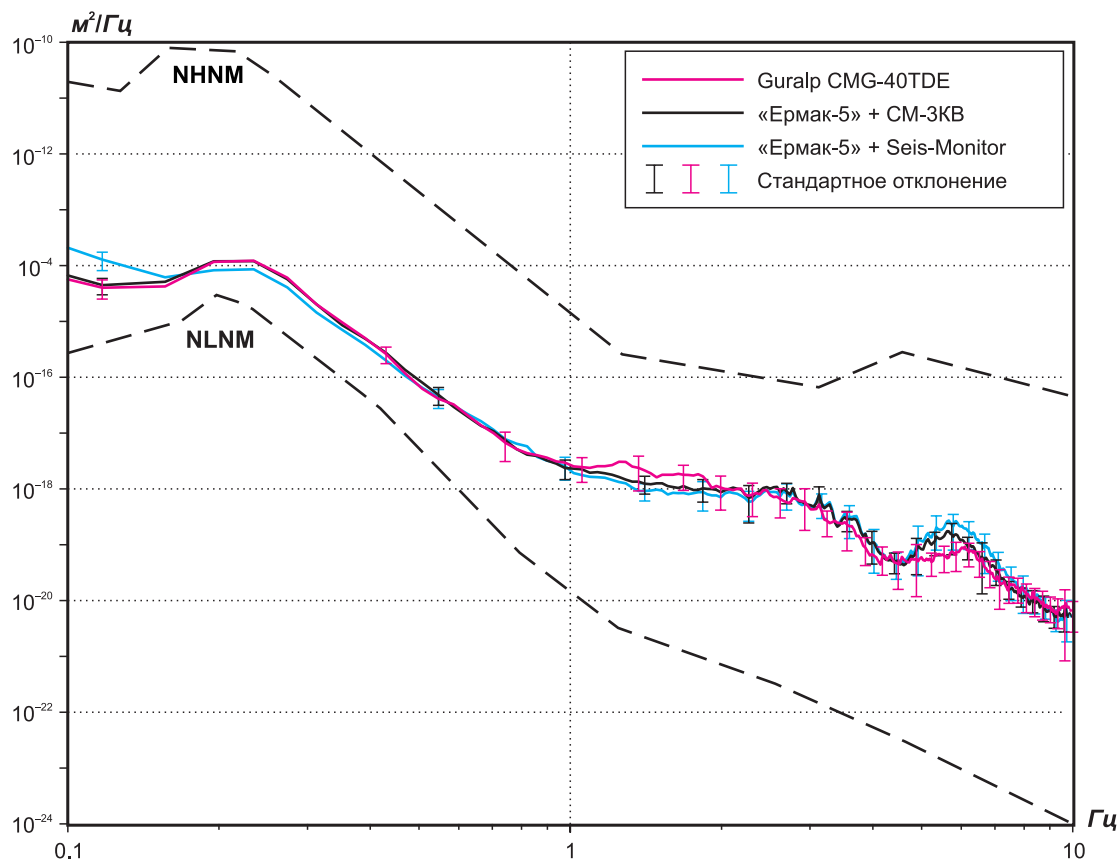


Рис. 1. Спектры мощности смещений. Вертикальная компонента

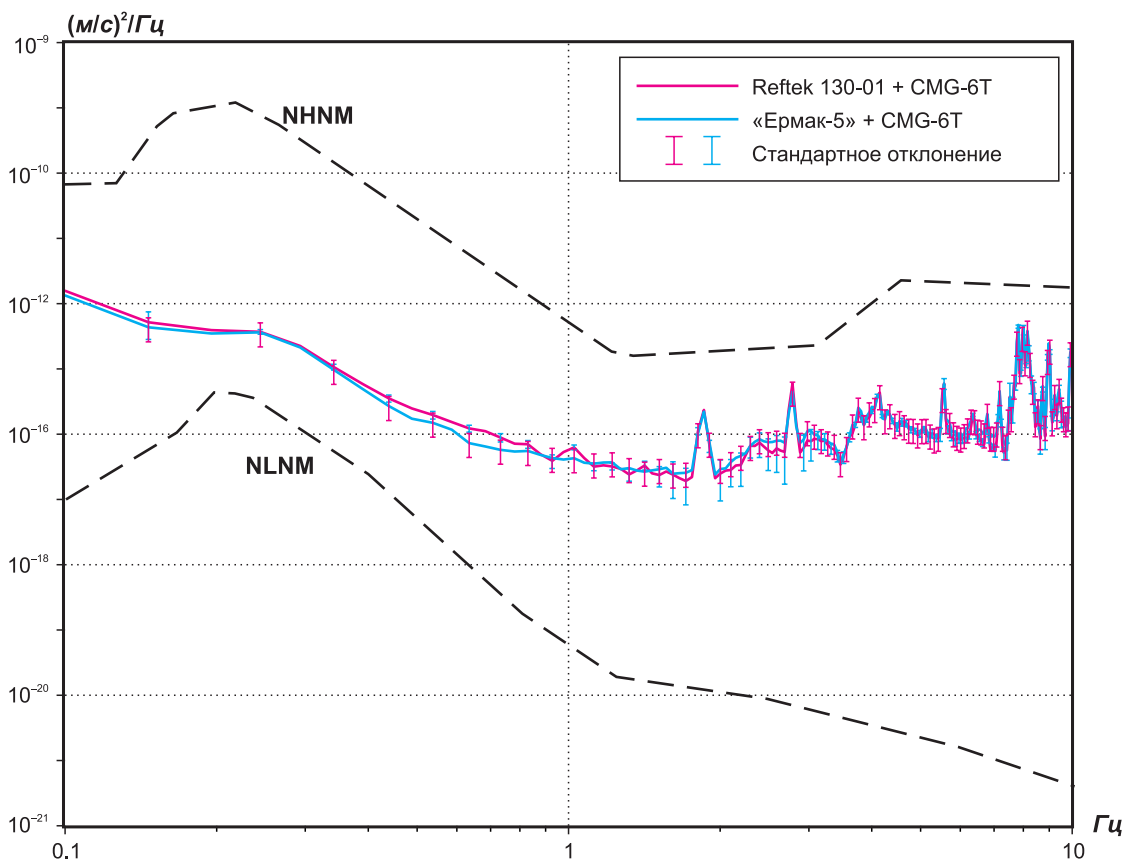


Рис. 2. Спектры мощности скоростей смещений. Вертикальная компонента

Таким образом, «Ермак-5» возможно применять для трёх основных вариантов мониторинга:

– автономные полевые измерения с применением GPS и записью данных на внутренние съёмные носители (рис. 3а);

– стационарные телесеismicические или региональные сейсмические станции с привязкой времени по GPS и передачей данных по доступным IP-сетям (Internet Protocol – основной протокол передачи данных) (рис. 3б);

– шахтный сейсмологический мониторинг с синхронизацией времени по NTP и передачей данных по медным линиям связи в шахте при помощи технологии DSL или по оптическим кабелям.

Синхронизация времени

Большое внимание в процессе разработки и последующего развития регистратора уделяется стабильному и точному механизму регулирования времени. В составе ядра времени «Ермак-5» применяется двухкаскадный 4-байтный таймер-счётчик (таймер высокого разрешения) с частотой тактирования около 22 МГц, что позволяет настраивать временную базу с точностью 45 нс.

Не всегда задача регистрации сейсмических сигналов сопровождается высокими требованиями к точности временной привязки, для этого предусмотрены локальные часы реального времени (RTC) без дальнейшей корректировки и синхронизации.

Синхронизация по GPS/GLONASS

GPS/GLONASS системы обеспечивают достаточный уровень точности привязки времени. В регистраторе «Ермак-5» используется стандартный подход: актуальное время получается на основе пакета с данными от GPS/GLONASS-модуля, а регулировка длины секунды выполняется на основе импульса PPS. Штатно прибор оснащён внешней активной GPS/GLONASS антенной, но дополнительно может быть установлен модуль с внутренней GPS/GLONASS антенной. Синхронизация по GPS/GLONASS позволяет достигать точности хода часов регистратора в пределах 180 нс.

Синхронизация по NTP

Основным преимуществом NTP, SNTP систем является возможность синхронизации времени через любой вариант IP-сети. Постоянная связь прибора с эталоном времени обеспечивает стабильную работу системы, но эта связь не может быть обеспечена постоянно. В этом случае точность хода часов обеспечивается кварцевым генератором. Алгоритм синхронизации по NTP обеспечивает стабильность в пределах 60 мкс на коротких интервалах и 0.5 мс – на длинных интервалах испытаний. Лабораторные испытания показали точность синхронизации в пределах 250 мкс между однородными регистраторами и стабильное движение часов регистратора за эталонными часами сервера времени



Рис. 3. Цифровой сейсмический регистратор «Ермак-5»: а – в исполнении «Поле»; б – в исполнении «Регион»

при использовании одной линии для передачи данных и синхронизации (временное распределение пакетов синхронизации и данных).

Снижение потребляемой электрической мощности

Прибор, оснащённый всеми предполагаемыми модулями и интерфейсами, имеет пиковое потребление 1.8 Вт . Снижение потребляемой мощности происходит за счёт гибкого управления питанием модулей прибора. Регистратор состоит из:

- базового блока (модуля сбора данных, процессора, внешней памяти);
- модуля проводного интерфейса Ethernet;
- модуля проводного интерфейса SHDSL;
- модуля отображения – LCD-экрана;
- модуля GPS/GLONASS с внешней подключаемой антенной;
- модуля GPS/GLONASS со встроенной антенной (устанавливается дополнительно).

Базовый блок и все каналы блока аналого-цифрового преобразователя питаются постоянно без использования режимов энергосбережения. Остальные модули подключаются к питанию в зависимости от выполняемых задач и конфигурации регистратора. Использование экрана носит временный характер, поэтому он может отключаться от питания автоматически через заданный период времени. Питание интерфейсных модулей зависит от выбранного режима сбора данных. Значительно влияет на снижение потребляемой мощности алгоритм адаптивного управления питанием GPS/GLONASS-модуля. Известно, что кварцевый генератор регистратора обеспечивает синхронность регистрации в течение десятков минут. Величина периода зависит и от свойств генератора, и от частоты дискретизации. Управление включением модуля зависит от динамики смещения временной базы от эталонной секунды, определяемой сигналом PPS. В результате минимальная потребляемая мощность при частоте дискретизации 500 Гц не превышает 320 мВт и не зависит от числа используемых каналов.

Запись и передача данных

Для регистратора не предусмотрено каких-либо специальных действий перед выключением питания: неожиданное выключение прибора не приводит к сбоям файловой системы и потере данных.

Конфигурирование каждого канала предусматривает отдельное управление записью на диск,

выдачей данных по сетевым запросам Seedlink, выводом волновой формы на экран. Ограничение возникает при использовании Seedlink – если данные не записываются на диск, по запросу выдаётся только актуальная порция данных из оперативной памяти. Предусмотрено получение всех записанных на диск данных по протоколу HTTP, при этом поддерживается пакетная загрузка файлов данных за определённый период.

Прибор поддерживает подключение через USB. Подключение USB-кабеля сопровождается запросом на доступ к данным. Если ответ не получен, прибор переходит в штатный режим регистрации с питанием от USB. Это позволяет запускать прибор с использованием подручных средств питания (мобильные зарядные устройства, персональные компьютеры (ПК), мобильные телефоны). Если разрешение на доступ получено, регистратор останавливает загрузку и «превращается» в съёмный накопитель. При этом весь объём карты памяти доступен на ПК или мобильном телефоне.

Опыт внедрения и эксплуатации

Кроме лабораторных испытаний, регистраторы «Ермак-5» тестировались или на данный момент работают на различных объектах мониторинга и полигонах:

- сейсмологический мониторинг ВКМКС (Пермский край) [Dyagilev et al., 2013];
- геофизические исследования гидроразрыва пласта (Пермский край, Республика Татарстан) [Белов и др., 2015];
- сейсмологический мониторинг зоны Краснослободского разлома РУ-2 ОАО «Беларуськалий» (Республика Беларусь) [Shulakov et al., 2020];
- сейсмическая сеть Дагестанского филиала ФИЦ ЕГС РАН (станции DBC «Дубки» и GNBR «Гуниб»);
- сейсмическая сеть Магаданского филиала ФИЦ ЕГС РАН (для проведения полевых исследований);
- промышленная площадка Восточного рудника, месторождений «Ньюрпакх» и «Коашва» (сейсмический мониторинг рудников ПАО «Апатит», Мурманская область);
- сейсмическая сеть Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН (для проведения полевых исследований);
- Институт исследования земного магнетизма и ионосферы РАН (г. Норильск);
- геофизическая обсерватория «Гарни» (Республика Армения);

– горнодобывающие предприятия Челябинской области (мониторинг промышленных взрывов) [Верхоланцев, Шулаков, 2014].

– ПАО «Уралкалий». Инструментальный мониторинг напряжённо-деформированного состояния межкамерных целиков. С целью записи медленно изменяющихся сигналов при контроле деформационных процессов в горных выработках была доработана микропрограмма прибора. Высокоточный датчик смещения вместе с регистратором «Ермак-5» (рабочее наименование SeisView) были протестированы и активно используются в настоящее время [Evseev, 2017].

Богатый опыт проведения полевых работ и установка сейсмопавильонов в шахте с использованием регистраторов GS, REFTEK, «Байкал-8» и «Ермак-5» показали, что наличие экрана ускоряет процесс развёртывания и ремонта сейсмопавильонов, а также повышает качество установки. Дисплей и клавиатура позволяют количественно оценить качество привязки времени, уровень микросейсмического шума или присутствие электрической помехи без применения дополнительных устройств, что особенно актуально в сложных погодных условиях. Наличие WEB-интерфейса позволяет проводить развёрнутый мониторинг состояния прибора по сети, либо при помощи мобильных устройств.

Эксплуатация регистратора «Ермак-5» со встроенным SHDSL-модулем позволяет обойтись одной линией связи для подачи питания, обмена данными и синхронизации времени. Во многих случаях это становится определяющим преимуществом. Проведённые испытания указывают на возможность стабильной работы системы при длине линии около 8 км.

При решении разнообразных прикладных задач мониторинга были определены и выделены следующие положительные особенности:

- получение непрерывных данных в режиме, близком к реальному времени;
- возможность настройки до шести логических сейсмических станций в одном приборе;
- полная реализация протокола SEEDLink v.3 с возможностью ретроспективной загрузки данных при обрыве связи;
- в качестве сетевого кольцевого буфера данных доступно всё пространство карты памяти;
- возможность визуального контроля волновых форм и точности синхронизации времени при настройке прибора (деформографа, сейсмодатчика);
- передача данных и питания по одной линии связи с использованием SHDSL и PoDSL (Power

over DSL – передача питания по линии DSL) технологий;

- синхронизация времени с точностью лучше, чем 0.5 мс, по IP-сети (через DSL);
- возможность ретроспективного получения данных по сети или со съёмного носителя, в том числе через USB;
- мониторинг состояния регистратора и оперативное управление (сброс, работа с файловой системой) при помощи HTTP-интерфейса;
- бесперебойная работа при низких температурах в условиях Крайнего Севера;
- автономная регистрация при использовании аккумуляторов ёмкостью 65 А·ч в течение двух месяцев;
- возможность обновления микрокода (с предварительным контролем целостности файла микрокода) и конфигурации по IP-сети.

Заключение

Основными достоинствами регистратора «Ермак-5» по сравнению с функциональными аналогами являются:

- визуальный контроль волновых форм;
- низкая потребляемая мощность (до 320 мВт);
- точная синхронизация времени.

Именно на развитие этих свойств в первую очередь были направлены системные и технические решения в проекте «Ермак-5».

«Ермак-5» позиционируется не только как автономный цифровой регистратор, но и как полнофункциональный сетевой прибор. В проекте реализованы все основные инструменты сбора данных, управления и мониторинга для решения широкого спектра геофизических задач.

В течение более чем пяти лет происходило развитие проекта – не только самого регистратора, но и систем, обеспечивающих сбор и анализ параметрической информации со всей сети сейсмопавильонов [Кичигин и др., 2019; Кичигин и др., 2020]. На сегодняшний день модернизация аппаратной части прибора не производится. Все дополнения и изменения касаются только микрокода и направлены на исправление неточностей алгоритма или корректировку сервисов управления и передачи данных.

Литература

Anatum регистратор [Электронный ресурс]. – [2020]. – URL: <https://dsys.ru/shop/po-kategorijam/seismicheskoe-oborudovanie/registratory/apatit-registrator.html>

- Аппаратурные разработки* [Электронный ресурс]. – [2021]. – URL: <http://igfurogan.ru/struktura/laboratoriya-sejsmometrii/apparaturnye-razrabotki>
- Байкал-8. Технические характеристики* [Электронный ресурс]. – [2021]. – URL: <http://expas-sib.com/posts/baykal-8.html>
- Байкал-А. Технические характеристики* [Электронный ресурс]. – [2021]. – URL: <http://expas-sib.com/posts/baykal-a.html>
- Белов С.В., Дьяконова П.С., Дягилев Р.А., Савич А.Д.* Применение сейсмоакустических методов при контроле гидроразрыва пласта // Каротажник. – 2015. – Вып. 10 (256). – С. 79–90.
- Бутырин П.Г.* Многофункциональный сейсмический регистратор SeisView-5. Технические решения и особенности применения // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Десятой Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2015а. – С. 60–62.
- Бутырин П.Г.* Надёжность как платформа для развития. Организационные и технические меры повышения надёжности при эксплуатации сейсмических регистраторов «Ермак-5» на различных объектах мониторинга // Горное эхо. – 2019. – № 1 (74). – С. 69–72.
- Бутырин П.Г.* От «SeisView» к «Ермаку». Опыт внедрения и функциональные преимущества // Стратегия и процессы освоения георесурсов. Сборник научных трудов. Вып. 15 / Гл. ред. А.А. Барях. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2017. – С. 201–203.
- Бутырин П.Г.* Технические и прикладные особенности цифровой телеметрической системы SeisView-5 // Стратегия и процессы освоения георесурсов. Сборник научных трудов. Вып. 13 / Гл. ред. А.А. Барях. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2015б. – С. 198–200.
- Бутырин П.Г.* Технологический максимум. Итоги разработки и эксплуатации сейсмического регистратора «Ермак-5» за 2017–2018 годы // Стратегия и процессы освоения георесурсов. Сборник научных трудов. Вып. 16 / Гл. ред. А.А. Барях. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2018. – С. 181–183.
- Бутырин П.Г., Верхованцев Ф.Г., Верхованцев А.В., Шулаков Д.Ю.* Цифровой сейсмический регистратор «Ермак-5». Опыт разработки и внедрения // Сейсмические приборы. – 2018. – Т. 54, № 2. – С. 5–23.
- Верхованцев А.В.* Использование дисперсионных кривых поверхностных волн для изучения грунтовых условий в рамках работ по СМР // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017а. – С. 79–81.
- Верхованцев А.В.* Контроль сейсмического воздействия БВР по результатам круглогодичного мониторинга // Стратегия и процессы освоения георесурсов. Сборник научных трудов. Вып. 15 / Гл. ред. А.А. Барях. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2017б. – С. 203–205.
- Верхованцев А.В., Шулаков Д.Ю.* Оценка сейсмического влияния буровзрывных работ на поверхностные здания и сооружения // Геофизика. – 2014. – № 4. – С. 40–45.
- Кичигин М.В., Бутырин П.Г.* Система удалённого мониторинга работоспособности сейсмических станций // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XIV Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 54.
- Кичигин М.В., Бутырин П.Г., Красилов С.А.* Подсистема хранения и визуализации параметров работы регистраторов серии «Ермак» // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020662315 от 12.10.2020.
- Матвеев И.В., Матвеева Н.В.* Портативный сейсмический регистратор «Сейсар-5» с очень низким энергопотреблением для автономной работы в сложных климатических условиях // Наука и технологические разработки. – 2017. – Т. 96, № 3. – С. 33–40. doi: 10.21455/std2017.3-3
- Разинков О.Г., Сидоров-Бирюков Д.Д., Parker T., Devannee P.* Широкополосный регистратор Pegasus с очень низким энергопотреблением для автономных сейсмических сетей // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XIV Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 80.
- Регистраторы* [Электронный ресурс]. – [2017]. – URL: http://r-sensors.ru/ru/products/data_loggers/
- Сейсмологический мониторинг Западного Урала* [Электронный ресурс]. – [2017]. – URL: <http://pts.mi-perm.ru/region/>
- Сенин Л.Н., Сенина Т.Е., Воскресенский М.Н.* Аппаратно-программный комплекс «РегистрSD» для изучения сейсродинамических характеристик объектов, находящихся под воздействием упругих колебаний // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – № 4. – С. 157–158. doi: 10.7868/S0032816217040115
- Сенин Л.Н., Сенина Т.Е., Парыгин Г.И., Воскресенский М.Н.* Исследование сейсродинамических характеристик строительных объектов с использованием регистратора сейсмических сигналов «Регистр» // Архитектон: известия вузов. – 2012. – № 2 (38). – С. 200–206.

Система мониторинга состояния объекта ZETLAB [Электронный ресурс]. – [2017]. – URL: <https://zetlab.com/sistema-monitoringa-sostoyaniya-obekta-zetlab/>

Татевосян Р.Э., Аммосов С.М., Антекман Ж.Я., Быкова В.В., Вакарчук Р.Н., Волков Н.В., Галина Н.А., Калинина А.В., Николаев Л.Д., Матвеев И.В., Матвеева Н.В., Михин А.Г., Мокрушина Н.Г., Парини И.Е., Татевосян Т.Н. Технология адаптивной системы мониторинга сейсмичности в районах размещения объектов ядерной энергетики // Наука и технологические разработки. – 2018. – Т. 97, № 2. – С. 5–24. doi: 10.21455/std2018.2-1

Шулаков Д.Ю., Бутырин П.Г., Верхоланцев А.В. Сейсмологический мониторинг Верхнекамского месторождения: задачи, проблемы, решения // Горный журнал. – 2018. – № 6. – С. 25–29. doi: 10.17580/gzh.2018.06.05

Evseev A., Baryah A., Butyrin P. Remote instrumental monitoring of interchamber pillar stability // Symposium of the International Society for Rock Mechanics. Procedia Engineering. – 2017. – 191. – P. 962–966.

Dyagilev R.A., Shulakov D.Y., Verholantsev A.V., Glebov S.V. Seismic monitoring in potash mines: observation results and development aspects // Eurasian Mining. – 2013. – N 2. – P. 24–28.

Shulakov D.Y., Verkhohantsev F.G., Zvereva A.S. Detailed seismological monitoring technology based on observations in the Krasnoslobodsky fault zone of the Starobinsk potash deposit (Conference Paper) // European Association of Geoscientists & Engineers. Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics 2020. – Sep 2020. – V. 2020. doi: 10.3997/2214-4609.202051057

Сведения об авторе

Бутырин Павел Генрихович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Федерального государственного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), г. Обнинск, Россия; науч. сотр. «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ГИ УрО РАН»). E-mail: pbg2000@mail.ru

Digital seismic logger “Ermak–5”. Five years of development

© 2021 P.G. Butyrin^{1,2}

¹GS RAS, Obninsk, Russia; ²MI UB RAS, Perm, Russia

Received August 19, 2021

Abstract The published data on several well-known seismic recorders used in modern seismological monitoring systems are considered, and their qualitative comparative analysis is carried out. Information about the presence of Russian devices of this class in the State Register of measuring instruments is given. The key technical characteristics of the “Ermak” recorder and confirming the results of laboratory and field experiments are given. At the same time, special attention is paid to the correspondence of the amplitude-frequency characteristics of the recorder to the reference analogs. A brief description of the flexible power management system for the recorder modules, which is designed to reduce power consumption, is given. The minimum value of the power consumption is about 300 mW when recording through six channels, which makes it possible to effectively use the device for long-term measurements using autonomous power supplies. The internal clock of the recorder is synchronized using GPS/GLONASS systems (hundreds of nanoseconds) and NTP-services (tens of microseconds). The efficiency of operation is ensured by the presence of a LCD-screen at the logger, on which, in addition to time and parametric information, waveforms are displayed in various display modes. There is also a list of facilities where “Ermak” was tested or is currently being operated.

Keywords seismic monitoring, seismic logger, data acquisition system, time synchronization, autonomous seismic station, broadband geophone, analog to digital converter, GPS receiver, power management.

For citation Butyrin, P.G. (2021). [Digital seismic logger “Ermak-5”. Five years of development]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(3), 84–94. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.06>

References

- Apatit registrator* [Apatit recorder]. (2020). Retrieved from <https://dsys.ru/shop/po-kategorijam/seismicheskoe-oborudovanie/registrator/apatit-registrator.html> (In Russ).
- Apparaturnye razrabotki* [Hardware developments]. (2021). Retrieved from <http://igfuran.ru/struktura/laboratoriya-sejsmometrii/apparaturnye-razrabotki> (In Russ).
- Bajkal-8. Tehnicheskie karakteristiki* [Baikal-8. Technical specifications]. (2021). Retrieved from <http://expas-sib.com/posts/bajkal-8.html> (In Russ).
- Bajkal-A. Tehnicheskie karakteristiki* [Baikal-A. Technical specifications]. (2021). Retrieved from <http://expas-sib.com/posts/bajkal-a.html> (In Russ).
- Belov, S.V., Dyakonova, P.S., Dyagilev, R.A., & Savich, A.D. (2015). [Using seismoacoustic methods for hydrofrac control]. *Karotazhnik* [Logger], 10(256), 79-90. (In Russ).
- Butyrin, P.G. (2015). [Multifunction seismic recorder SEISVIEW-5. Solutions and application features]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Materialy Desjatoj Mezhdunarodnoj seismologicheskoi shkoly* [Proceedings of the X International Seismological Workshop “Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data”. Ed. A.A. Malovichko] (pp. 60-62). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Butyrin, P.G. (2015). [Technical and applied features of the digital telemetry system SeisView-5]. In *Strategiia i protsessy osvoeniia georesursov. Sbornik nauchnykh trudov. Vyp. 13. Gl. red. A.A. Bariakh* [Strategy and processes of development of geo-resources. Collection of scientific papers. Is. 13. Ch. ed. A.A. Bariakh] (pp. 198-200). Perm, Russia: MI UB RAS Publ. (In Russ.).
- Butyrin, P.G. (2017). [From “SeisView” to “Ermak”. Implementation experience and functional advantages]. In *Strategiia i protsessy osvoeniia georesursov. Sbornik nauchnykh trudov. Vyp. 15. Gl. red. A.A. Bariakh* [Strategy and processes of development of geo-resources. Collection of scientific papers. Is. 15. Ch. ed. A.A. Bariakh] (pp. 201-203). Perm, Russia: MI UB RAS Publ. (In Russ.).
- Butyrin, P.G. (2018). [Technological maximum. Results of the development and operation of the Ermak-5 seismic recorder for 2017-2018]. In *Strategiia i protsessy osvoeniia georesursov. Sbornik nauchnykh trudov. Vyp. 16. Gl. red. A.A. Bariakh* [Strategy and processes of development of geo-resources. Collection of scientific papers. Is. 16. Ch. ed. A.A. Bariakh] (pp. 181-183). Perm, Russia: MI UB RAS Publ. (In Russ.).
- Butyrin, P.G. (2019). [Reliability as a platform for development. Organizational and technical measures to improve the reliability of the operation of seismic recorders “Ermak-5” at various monitoring facilities]. *Gornoe jecho* [Mountain Echo], 1(74), 69-72. (In Russ). doi: 10.7242/echo.2019.1.15
- Butyrin, P.G., Verkholtantsev, F.G., Verkholtantsev, A.V., & Shulakov, D.Y. (2019). Digital seismic logger “Ermak-5”. Experience of development and implementation. *Seismic Instruments*, 55(2), 117-128. doi: 10.3103/S0747923919020051
- Dyagilev, R.A., Shulakov, D.Y., Verkholtantsev, A.V., & Glebov, S.V. (2013). Seismic monitoring in potash mines: observation results and development aspects. *Eurasian mining*, 2, 24-28.
- Evseev, A., Baryah, A., & Butyrin, P. (2017). Remote instrumental monitoring of interchamber pillar stability. *Symposium of the International Society for Rock Mechanics. Procedia Engineering*, 191, 962-966.
- Kichigin, M.V., & Butyrin, P.G. (2019). [The system of remote monitoring of the performance of seismic stations]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Tezisy XIV Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly. Otv. red. A.A. Malovichko* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Abstracts of the XIV International Seismological Workshop. Ed. A.A. Malovichko] (p. 54). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Kichigin, M.V., Butyrin, P.G., & Krasilov, S.A. (2020). [Subsystem for storing and visualizing the parameters of the operation of the “Ermak” series recorders]. Certificate of state registration of a computer program No. 2020662315. (In Russ.).
- Matveev, I.V., & Matveeva, N.V. (2018). [SEISAR-5 Portable seismic recorder with low energy consumption for autonomous operation in harsh climatic conditions]. *Seismic Instruments*, 54(6), 626-630. doi: 10.3103/S0747923918060087
- Razinkov, O.G., Sidorov-Birjukov, D.D., Parker, T., & Devanney, P. (2019). [Pegasus broadband recorder with very low power consumption for autonomous seismic networks]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Tezisy XIV Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly. Otv. red. A.A. Malovichko* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Abstracts of the XIV International Seismological Workshop. Ed. A.A. Malovichko] (p. 80). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Registrator* [Loggers] (2017). Retrieved from http://rsensors.ru/ru/products/data_loggers/ (In Russ.).
- Seismologicheskij monitoring Zapadnogo Urala* [Seismological monitoring of the Western Urals] (2017). Retrieved from <http://pts.mi-perm.ru/region/> (In Russ.).
- Senin, L.N., Senina, T.Ye., Parygin, G.I., & Voskresensky, M.N. (2012). [Examination of the seismodynamic characteristics of buildings using the “REIG-STR” recorder of seismic signals]. *Arhitekton: izvestija vuzov* [Architecton: Proceedings of higher education],

2(38). Retrieved from http://archvuz.ru/en/2012_2/10 (In Russ.).

Senin, L.N., Senina, T.Ye., & Voskresensky, M.N. (2017). [Hardware and software complex “RegistrSD” for studying the seismodynamic characteristics of objects under the influence of elastic vibrations]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 4, 157-158. (In Russ.). doi: 10.7868/S0032816217040115

Shulakov, D.Yu., Butyrin, P.G., & Verkholtantsev, A.V. (2018). [Seismological monitoring at the Upper Kama Potash Deposit: Objectives, problems, solutions]. *Gornyi Zhurnal* [Mining Journal], 6, 25-29. (In Russ.). doi: 10.17580/gzh.2018.06.05

Shulakov, D.Y., Verkholtantsev, F.G., & Zvereva, A.S. (2020). Detailed seismological monitoring technology based on observations in the Krasnoslobodsky fault zone of the Starobinsk potash deposit (Conference Paper). *European Association of Geoscientists & Engineers. Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics, 2020*. doi: 10.3997/2214-4609.202051057

Sistema monitoringa sostoyaniia ob"ekta ZETLAB [ZETLAB object Status Monitoring System]. (2017). Retrieved from <https://zetlab.com/sistema-monitoringa-sostoyaniya-obekta-zetlab/> (In Russ.).

Tatevossian, R.E., Ammosov, S.M., Aptekman, J.Ja., Bykova, V.V., Vakarchuk, R.N., Volkov, N.V., Galina, N.A., Kalinina, A.V., Nikolaev, L.D., Matveev, I.V., Matve-

eva, N.V., Mikhin, A.G., Mokrushina, N.G., Parini, I.E., & Tatevossian, T.N. (2018). [Technology of the adaptive seismic monitoring system in the regions of nuclear energy objects]. *Nauka i tehnologicheskie razrabotki* [Science and technological developments], 97(2), 5-24. (In Russ.).

Verkholtantsev, A.V. (2017). [Monitoring of the seismic impact of the BVR according to the results of year-round monitoring]. In *Strategiia i protsessy osvoeniia georesursov. Sbornik nauchnykh trudov. Vyp. 15. Gl. red. A.A. Bariakh* [Strategy and processes of development of geo-resources. Collection of scientific papers. Is. 15. Ch. ed. A.A. Baryakh] (pp. 203-205). Perm, Russia: MI UB RAS Publ. (In Russ.).

Verkholtantsev, A.V. (2017). [The use of dispersion curves of surface waves for the study of ground conditions in the framework of work on SMR]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretacii seismologicheskikh dannyh. Materialy XII Mezhdunarodnoj seismologicheskoi shkoly* [Proceedings of the XII International Seismological Workshop “Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data”. Ed. A.A. Malovichko] (pp. 79-81). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

Verkholtantsev, A.V., & Shulakov, D.Yu. (2014). [Estimation of seismic effect drilling-and-blasting operations for buildings]. *Geofizika* [Geophysics], 4, 40-45. (In Russ.).

Information about author

Butyrin Pavel Genrikhovich, PhD, Senior Researcher of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS), Obninsk, Russia; Researcher of the “Mining Institute Ural Branch Russian Academy of Sciences” Branch of the Perm Federal Research Center Ural Branch Russian Academy of Sciences (MI UB RAS), Perm, Russia. E-mail: pbg2000@mail.ru