

УДК 550.380+550.8.04+550.8.028

ИТ-ИНФРАСТРУКТУРА СЕТИ ГЕОМАГНИТНЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ

© 2020 г. И.М. Алёшин^{1,2}, С.Д. Иванов¹, В.Н. Корягин¹, И.В. Матвеев¹,
Ф.В. Передерин¹, А.А. Соловьёв^{1,2}, К. И. Холодков¹

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

Цель представляемых исследований – разработка современной информационной инфраструктуры региональной (или сегмента глобальной) сети геомагнитных обсерваторий, позволяющей максимально автоматизировать сбор, хранение и распространение данных измерений, включая их передачу в режиме реального времени. Обсуждается решение ряда задач, необходимых для реализации такой системы. В частности, рассмотрены некоторые технические аспекты создания системы сбора геомагнитных данных, такие как точность установки временных меток, выбор протокола оперативной передачи измерений, в том числе в режиме реального времени.

Приводится подробное описание протокола *SeedLink* и его сопоставление с протоколом *MQTT*. Рассмотрена реализация инфраструктуры оперативного сбора результатов геомагнитных измерений на базе протокола *SeedLink*. Кратко описана структура Центра агрегации данных и рассмотрен действующий макет геомагнитной обсерватории с измерительным оборудованием *FGE* и *POS-1*, модулем АЦП Сейсар-5 и регистратором на базе одноплатного компьютера.

Ключевые слова: INTERMAGNET, односекундная регистрация, оперативная передача данных, *SeedLink*, *MQTT*, геомагнитная обсерватория.

Введение

В настоящее время созрела необходимость создания современной информационной инфраструктуры сбора, передачи и хранения результатов геомагнитных измерений. Это обусловлено ростом числа геомагнитных обсерваторий, переходом к односекундной регистрации данных [Turbit et al., 2014; Chulliat et al., 2009; Reda, Neska, 2016], а также востребованностью оперативного доступа к ним. Требуемые изменения инфраструктуры затрагивают, главным образом, процесс сбора первичных данных и передачи их в центры хранения. Применительно к мировой сети геомагнитных обсерваторий INTERMAGNET [Love, 2008] обновление инфраструктуры затронет обсерватории и центры сбора данных без изменения процедур подготовки окончательных продуктов *quasi-definitive* и *definitive data* [Peltier, Chulliat, 2010].

Современная инфраструктура обязана обеспечивать автоматизацию всего цикла от регистрации в обсерватории до публикации результата (продукта), будучи при этом надежной, простой в настройке, нетребовательной к обслуживанию. Важным требованием на сегодняшний день является передача данных в реальном времени и хорошая горизонтальная масштабируемость.

Главные составляющие инфраструктуры – наблюдательные сети и Центр агрегации данных (ЦАД), включающий один или несколько центров обработки данных, которые должны удовлетворять жестким, возрастающим пропорционально размеру сети и ценности получаемых продуктов требованиям по отказоустойчивости и масштабированию. Внутренняя структура ЦАД существенно зависит от деталей реализации компонент инфраструктуры. Подробно пример центра агрегации данных описан в работе [Ivanov et al., 2019].

Ключевой момент при построении информационной инфраструктуры – выбор протокола, объединяющего сеть сбора данных (наблюдательную сеть) и центры их обработки в единую информационную систему, обеспечивающую эффективную передачу данных измерений в реальном времени по каналам связи разной степени надежности.

Ставший общеупотребительным термин “передача в реальном времени”¹ требует уточнения. Во-первых, поскольку мгновенная передача информации невозможна, то “передача в реальном времени” означает существование заданного промежутка времени (времени запаздывания), в течение которого вновь полученные данные станут гарантированно доступны потребителю. Время запаздывания определяется, в конечном счёте, внутренней логикой решаемой задачи. Так, при использовании геомагнитных данных для оценки космической погоды допустима задержка в 20–30 мин, а при передаче данных в INTERMAGNET задержка может составлять и 72 ч [INTERMAGNET..., 2012].

В качестве элемента наблюдательной сети рассматриваемой инфраструктуры мы выбрали трехосевой магнитометр *FGE* [Fluxgate magnetometer, 2014], сопряженный с модулем АЦП *Seisar-5* [Мамвеев, Мамвеева, 2017]. На его основе был разработан полностью функционирующий прототип системы сбора и оперативной передачи данных геомагнитных измерений.

Протокол передачи данных

Обычно геомагнитные наблюдения из обсерватории в центр сбора данных поступают порциями, записанными в файлы. Для передачи используется один из стандартных протоколов семейства *TCP/IP*: *HTTP*, *SCP*, *SFTP*, *FTP* и даже *SMTP* (см., например, [INTERMAGNET..., 2012]). Такой способ доставки обусловлен двумя причинами. Во-первых, использование файлов диктуется программным обеспечением регистратора. Во-вторых, доступность и простота использования программных реализаций как серверной, так и клиентской частей этих протоколов позволяет достаточно просто организовать процесс передачи данных, как правило, с помощью нескольких *shell*-скриптов. В целом, при малой дискретизации и небольшом числе обслуживаемых обсерваторий такое решение вполне приемлемо. Очевидные проблемы возникают при необходимости горизонтального масштабирования системы сбора. Передача данных в реальном времени на основе протоколов общего назначения также затруднительна, главным образом, из-за ориентации этих протоколов на работу с файлами. Размер передаваемого файла, определяемый допустимым временем доставки, в таком случае будет невелик, что приводит к большим накладным расходам при передаче данных и неэффективному использованию локальной файловой системы (хранение большого числа маленьких файлов). Возможна ситуация, при которой объем служебной информации в десятки раз превосходит объем полезных данных. Из-за отсутствия встроенного механизма индексирования получаемых файлов сложно организовать учёт переданной информации.

В качестве компромиссного решения можно рассмотреть схему, в которой для промежуточного хранения данных вместо файлов используется система управления базами данных (СУБД) [Соловьев и др., 2017]. Такой путь обеспечивает эффективное хранение и индексацию измерений, а также предоставляет большой набор инструментов для обслуживания системы (резервное копирование и архивация данных, ограничение доступа, контроль целостности и др.). Решения, использующие СУБД общего назначения, тоже не лишены недостатков, главные из которых сопряжены со сложностью масштабирования базы при росте объема хранимых данных, а также с отсутствием стандарта их хранения.

¹ Нами будет использоваться синоним этого термина – “оперативная передача”.

Последовательное решение проблемы, на наш взгляд, возможно только на основе протокола, изначально ориентированного на оперативную передачу данных. Таких протоколов существует несколько. Нами использовался протокол *SeedLink*¹, созданный для передачи сейсмических данных, но вполне пригодный для работы с любыми временными рядами, в том числе и с рядами геомагнитных данных [Aleshin et al., 2016; Передерин и др., 2016; Алёшин и др., 2018]. Важное преимущество названного протокола, существенно упрощающее настройку как локальных служб, так и системы сбора в целом, – наличие большого количества готовых инструментов для получения данных, их визуализации, ведения архива и прочих рутинных операций.

Протокол *SeedLink*, разработанный сотрудниками Потсдамского центра наук о Земле (*GFZ*, Потсдам, Германия) при создании программного пакета *SeisComP*², можно определить как протокол для передачи данных в формате *miniSEED*³. В этом формате данные сгруппированы в записи – блоки фиксированной длины размером от 256 до 2256 байт. В начале каждой записи размещен заголовок с метаданными; оставшаяся часть содержит собственно измерения (данные). Формат *miniSEED* допускает представление данных в виде целых чисел разной длины, чисел с плавающей точкой (одинарной и двойной точности) и ASCII-символов. Для увеличения эффективности хранения и передачи данных записи могут содержать значения, сжатые одним из нескольких алгоритмов. Контроль целостности данных осуществляется на уровне *TCP*. Кроме того, передача сжатых данных подразумевает контроль целостности при их распаковке, что, помимо прочего, повышает достоверность получаемых данных. В соответствии с логикой работы *TCP*, обнаружение ошибки приводит к повторной посылке пакета.

Для протокола *SeedLink* известно несколько программных реализаций сервера и клиента. В самой распространённой версии, входящей в пакет *SeisComP*, помимо прочего, реализован простой механизм интеграции в систему практически любого источника данных. Для этого достаточно небольшой программы сбора данных (плагина), которая конвертирует измерения в формат *miniSEED*. Каждая такая программа (плагин) получает данные по одному или нескольким цифровым каналам, преобразует их в формат *miniSEED* и передаёт *SeedLink*-серверу. В задачи сервера входит также мониторинг состояния программы сбора данных. Каждый *SeedLink*-сервер в качестве источника данных может использовать другой *SeedLink*-сервер, для чего в пакете *SeisComP* применяется плагин *chain*.

От конфигурации *SeedLink*-сервера зависит список программ сбора данных и каналов, доступных клиентам. Для каждого канала создаётся отдельный кольцевой буфер, в котором накапливаются данные по мере их поступления. При установке соединения каждый клиент указывает имя канала (или группы каналов) и время (или номер блока), начиная с которого ему требуются данные. Благодаря этому могут быть затребованы не только самые последние, но и ретроспективные данные за предыдущие временные периоды. Глубина ретроспективы определяется заданным в настройках сервера размером буфера, максимальное значение которого ограничено ресурсами файловой системы. Такая организация данных на *SeedLink*-сервере естественным образом обеспечивает восстановление разорванного соединения и при необходимости повторную передачу данных.

Пример схемы передачи данных с использованием протокола *SeedLink* представлен на рис. 1.

¹ URL: <http://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/services/seedlink/> (дата обращения: 25.02.2020a).

² URL: <https://www.seiscomp3.org/doc/applications/seedlink.html> (дата обращения: 25.02.2020b).

³ URL: <http://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/data/formats/miniseed/> (дата обращения: 25.02.2020).

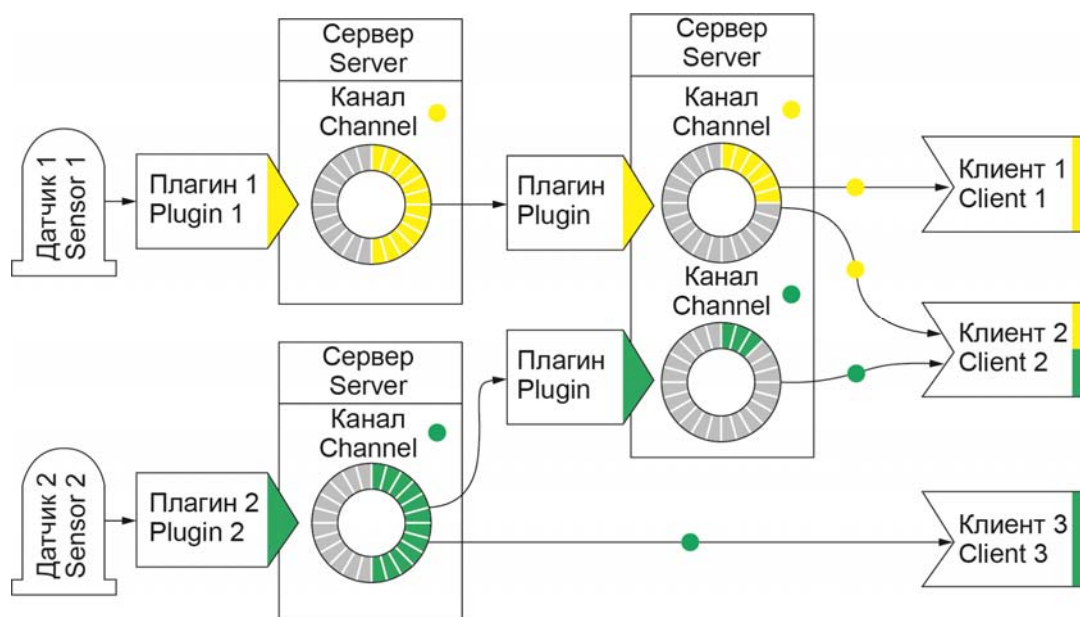


Рис. 1. Схема передачи данных с использованием протокола *SeedLink*

Fig. 1. Scheme of data path using SeedLink protocol

Существующие на сегодняшний день реализации протокола *SeedLink* не свободны от недостатков. Так, упомянутый *SeedLink*-сервер пакета *SeisComP* допускает представление данных исключительно в виде 32-битных знаковых целых. При этом размер блока фиксирован и составляет 512 байт; из полдюжины описанных в справочном руководстве [SEED Reference Manual, 2012] алгоритмов сжатия поддерживается только один. Полное формальное описание используемого в программе протокола не опубликовано, в связи с чем отмеченные недостатки нельзя рассматривать как ошибки реализации, но их наличие свидетельствует о неполной поддержке сервером всех возможностей формата *miniSEED*.

Ещё одна особенность протокола *SeedLink* обусловлена размещением серверной компоненты непосредственно на регистраторе, то есть для передачи информации в центр данных необходимо, чтобы размещённые там клиенты инициировали соединение с сервером. Этот аспект не имеет принципиального значения, если соединение устанавливается в пределах локальной сети или с использованием интернет-протокола версии 6 (*IPv6*). Однако в сетях *IPv4* прямое сетевое соединение с регистратором, как правило, затруднено из-за повсеместного применения механизма преобразования сетевых адресов *NAT* (*Network Address Translation*). Для решения этой проблемы нами была использована технология виртуальных частных сетей *VPN* (*Virtual Private Network*) [Алешин и др., 2014]. Для этого на регистраторе должна быть размещена программа *VPN*-клиент, которая при запуске установит шифрованное соединение с *VPN*-сервером центра данных. Созданный канал связи обеспечивает непосредственную адресацию к регистратору и может быть использован как для передачи данных, так и для удалённого управления регистрирующей аппаратурой. Кроме того, наличие *VPN*-канала обеспечивает защиту данных от несанкционированного доступа.

Протокол *SeedLink* нельзя использовать в случае неравномерного распределения измерений во времени. Кроме того, этот протокол оказывается неэффективным для временных рядов с низкой частотой дискретизации. В таких случаях лучше обратиться к протоколу, ориентированному на передачу сообщений.

В [Bracke et al., 2017] описано применение для передачи геомагнитных измерений в реальном времени протокола *MQTT* (*Message Queuing Telemetry Transport*). Этот протокол относится к семейству протоколов, используемых для реализации концепции Интернета вещей (*Internet of Things, IoT*); передача и получение данных по нему осуществляется специальной программой-клиентом. Клиент может выступать в двух ролях – публикатора (*publisher*) и подписчика (*subscriber*). Технически клиенты обоих типов не отличаются друг от друга. Более того, один и тот же клиент может быть одновременно и подписчиком, и публикатором. Доставку данных от публикатора к подписчику осуществляет брокер, в задачу которого, помимо получения и передачи данных, входит ведение списка доступных каналов данных, создание и обслуживание каналов по запросу подписчиков, контроль доставки информации и разграничение доступа.

Процесс передачи данных по протоколу *MQTT* подразумевает регистрацию подписчиков на сервере, который служит брокером данных. Подписчики получают идентификатор и выбирают каналы, по которым хотят получать данные. Публикаторы, в свою очередь, подключаются к серверу и отправляют сообщения в те или иные каналы. Подписчики получают сообщения немедленно или при следующем подключении к серверу. Для каждого подписчика сообщения по каналам, на которые он подписан, до востребования хранятся в буфере, размер которого определяется конфигурацией сервера. После передачи сообщения данные из буфера удаляются. Брокер может выступать в роли подписчика по отношению к другому брокеру.

Описанная конфигурация удобна при организации иерархических сетей наблюдений. Например, клиенты на станциях передают измерения локальному брокеру, перенаправляющему их брокеру, установленному в центре данных, который, в свою очередь, пересылает полученные данные конечным пользователям – подписчикам (рис. 2).

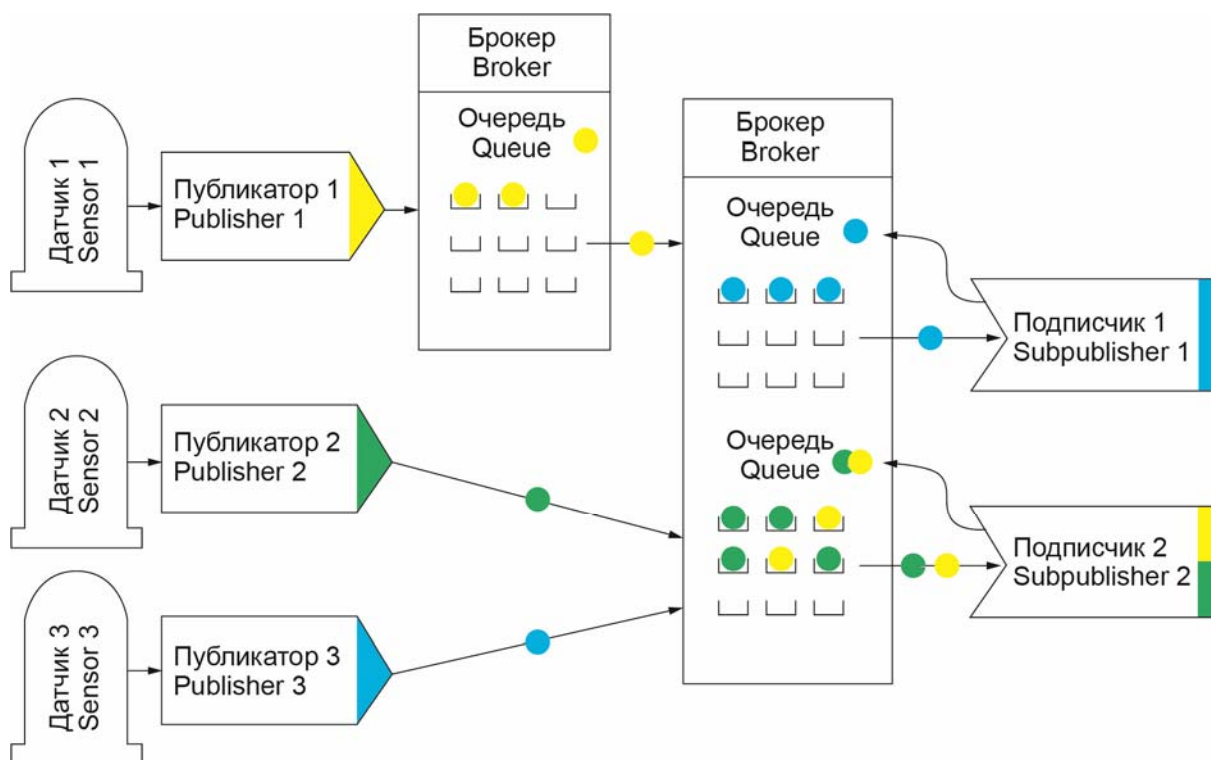


Рис. 2. Схема передачи данных с использованием протокола *MQTT*

Fig. 2. Scheme of data path using MQTT protocol

Протокол *MQTT* имеет ряд недостатков, препятствующих его применению в качестве основного механизма передачи геомагнитных данных с высокой частотой дискретизации. Во-первых, в протоколе отсутствует встроенный механизм повторной передачи данных (подписчик не может повторно запросить сообщение, уже единожды отправленное ему); во-вторых, в нём не определён формат передаваемых данных. Как и в схеме с базой данных общего назначения, это требует от пользователя применения специального программного обеспечения для декодирования получаемой информации. Поэтому, несмотря на перспективность и активное развитие протокола *MQTT*, наше решение ориентировано в первую очередь на специализированный протокол *SeedLink*. Значимые для передачи данных в режиме реального времени параметры приведены в таблице, где серой заливкой выделены те из них, которые определили наш выбор в пользу протокола *SeedLink* и пакета *SeisComP* в целом.

Сводная таблица свойств протоколов *SeedLink* и *MQTT*

Параметры	Протоколы	
	<i>SeedLink</i>	<i>MQTT</i>
Возможность выбора канала		+
Наличие программных реализаций, библиотек и т.п.	+	+
Наличие инструментов формирования архива	+	–
Возобновление передачи после разрыва	+	+
Повторная передача данных	+	–
Переменный шаг по времени	–	+
Произвольный формат данных	–	+
Фиксированный формат данных	+	–
Произвольный размер блока	–	+
Сжатие данных	+	–
Шифрование	–	+
Расположение сервера данных в центре данных	–	+
Ретрансляция данных с другого сервера	+	+

Примечание. Плюс (+) означает наличие параметра, минус (–) – его отсутствие.

При выборе для нас было важно то, что, во-первых, кроме программных библиотек, в состав пакета *SeisComP* входит ряд утилит, предназначенных для сбора данных (*slinktool*), мониторинга состояния системы регистрации (*diskmon*, *scmaster*), ведения архива (*slarchive*). Во-вторых, фиксированный формат передаваемых данных позволяет унифицировать систему сбора для приборов различного типа. В-третьих, установка и настройка этой системы достаточно проста как со стороны регистратора, так и со стороны центра данных. Наконец, готовая реализация механизма повторной передачи данных весьма полезна, особенно в условиях нестабильного канала связи.

Центр агрегации данных

Обслуживание обсерваторий, входящих в локальную сеть (или в сегмент глобальной сети), требует создания промежуточного узла, который мы будем называть Центром агрегации данных (ЦАД). Подробное описание устройства и функционирования ЦАД требует отдельного рассмотрения, но в данной статье мы ограничимся кратким перечислением его основных свойств. Общая схема структуры ЦАД показана на рис. 3.

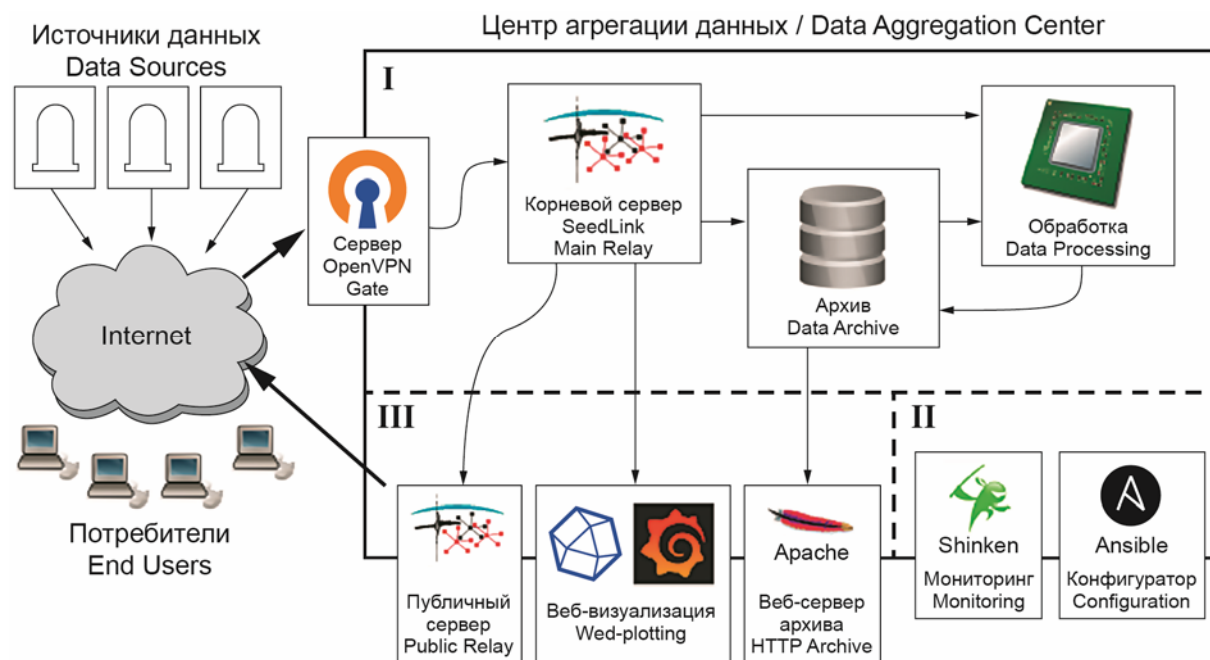


Рис. 3. Структура центра агрегации данных (ЦАД). I–III – группы служб, предназначенных для решения разных задач

Fig. 3. The structure of Data Aggregation Center (DAC). I–III are groups of services designed for different tasks

Входящие в состав ЦАД службы в соответствии с решаемыми ими задачами могут быть разделены на три группы. Службы группы I (см. рис. 3) предназначены для реализации базовых функций центра сбора и обработки данных, обеспечивая получение измерений из обсерваторий, ведение архива, резервное копирование, контроль сохранности информации и пр. К этой группе можно отнести также программное обеспечение первичной обработки данных и их подготовки к распространению и публикации.

Службы группы II ориентированы на контроль работы регистрирующего оборудования обсерваторий – мониторинг состояния критических компонентов центра, организация удалённого доступа к устройствам и/или дистанционной настройки параметров регистрации. Важность этих задач и их доля в общем объёме работ, проводимых в ЦАД, существенно возрастает с увеличением количества обсерваторий в составе сети.

К группе III относятся службы, обеспечивающие доступ клиентов к данным ЦАД, – доступ к архиву измерений, визуализация, потоковая передача и т.п. Использование протокола *SeedLink* облегчает решение этих задач. С одной стороны, наличие развитого инструментария по работе с файлами в формате *miniSEED* значительно упрощает работу по организации и хранению данных; с другой – использование этого протокола позволяет унифицировать программное обеспечение обсерваторий. Различия в поддержке оборудования заканчивается на уровне соответствующего *SeedLink*-плагина; все остальные операции по доставке информации, равно как ведение локального архива и другие служебные функции, выполняются единообразно.

Как уже было отмечено выше, службы группы I обеспечивают сбор и хранение данных. Основу этой группы составляет корневой *SeedLink*-сервер, ретранслирующий данные, предоставляемые серверами обсерваторий в составе сети. После получения и при необходимости предварительной обработки измерения передаются службе, обеспечивающей хранение данных. Отметим, что для ведения архива удобно использовать

утилиту *Slarchive* из пакета *SeisComP*. Для соединения используется технология виртуальных частных сетей (*VPN*), поддержку которой в ЦАД осуществляет соответствующая служба, например, *OpenVPN*¹. Настройка функционирования оборудования в обсерваториях может быть в значительной степени автоматизирована, если использовать систему управления конфигурациями, например, *Ansible*², которая наряду с системой мониторинга *Shinken* относится к группе служб II (см. рис. 3). Группа служб III ориентирована на публикацию и распространение данных. Визуализация измерений, доступ к метаданным, каталогам и архивам осуществляется стандартным образом по протоколу *HTTP*. Для передачи данных в реальном времени опять-таки удобно использование протокола *SeedLink* (публичный сервер).

Оборудование обсерватории для оперативной передачи результатов измерений

Требования к односекундным данным, предъявляемые в сети INTERMAGNET, включают необходимость обеспечения абсолютной погрешности определения времени не более 10 мс [*Turbitt et al.*, 2014]. Для этого должна выполняться регулярная синхронизация системы регистрации с источником сигналов точного времени, в качестве которого могут выступать приёмник ГНСС или радиоприёмник сигналов точного времени. Также можно воспользоваться интернет-протоколом точного времени *NTP* (см., например, [*Morschhauser et al.*, 2017]), который обеспечивает точность определения времени порядка 1 мс.

В приёмниках ГНСС, как правило, реализована двухканальная схема передачи сигналов точного времени. Один канал предназначен для передачи по последовательному протоколу меток времени в формате *NMEA*³, второй – для передачи сигналов синхронизации *PPS*⁴, позволяющих точно отождествлять метку с определенным моментом времени. Точность определения времени при использовании такой схемы может достигать 1 мкс.

На точность фиксации момента времени может влиять задержка, возникающая в тракте передачи данных [*Chulliat et al.*, 2009], которая включает две составляющие – одна связана с аналоговой частью системы, другая – с цифровой.

Связанная с аналоговой частью системы (цепи датчика, усилителя и входной части АЦП) задержка, которую мы обозначили как δt_A (рис. 4), определяется переходной функцией названных компонент системы. Для данного набора оборудования задержка δt_A постоянна и может быть измерена экспериментально. Время запаздывания сигнала в цифровой части системы (цифровые компоненты АЦП, канал передачи данных между модулем АЦП и регистратором, а также собственные задержки регистратора), обозначенное нами как δt_D , определяется логикой работы модуля АЦП, способом его подключения и задержками внутри регистратора δt_L . Труднее всего определить последнюю из трёх перечисленных величин.

Как правило, основу регистратора составляет компьютер с операционной системой общего назначения. Особенности работы таких операционных систем не позволяют осуществлять процедуры установки меток времени с гарантированной задержкой.

¹ URL: <https://openvpn.net/> (дата обращения: 25.02.2020).

² URL: <https://www.ansible.com/> (дата обращения: 25.02.2020).

³ URL: https://www.nmea.org/content/STANDARDS/NMEA_0183_Standard (дата обращения: 25.02.2020).

⁴ URL: <http://doc.ntp.org/4.1.1/pps.htm> (дата обращения: 25.02.2020).

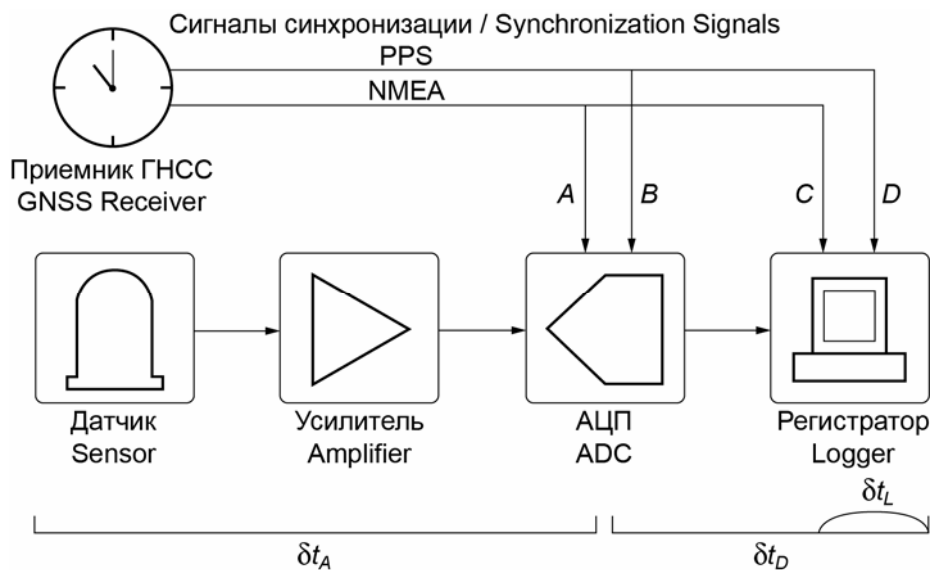


Рис. 4. Источники задержки в тракте сбора данных и возможные точки ввода сигналов точного времени. *A, B, C, D* – каналы передачи меток точного времени

Fig. 4. Delay sources in the data acquisition path and possible input points of time signals. *A, B, C, D* are transmission channels of time stamps

Однако отмеченную трудность можно обойти, если вынести выполнение этой процедуры частично или полностью за пределы регистратора.

Наиболее простой способ временной ассоциации измерений подразумевает наличие точного времени только на регистраторе (см., например, [Morschhauser et al., 2017]). В этом случае из четырёх каналов передачи меток, отмеченных на рис. 4 буквами *A, B, C, D*, задействованы только два – *C* и *D*. Задержка δt_D определяется экспериментально или на основе теоретических оценок.

Второй способ подразумевает синхронизацию работы АЦП в соответствии с сигналами точного времени. На модуль АЦП подаётся как сигнал синхронизации, так и метки времени (каналы *A, B* на рис. 4). Такая схема приводит к усложнению модуля, но при этом позволяет полностью исключить неопределённую задержку δt_L в регистраторе. Этот способ синхронизации реализован, например, в приборах, описанных в [Reda, Neska, 2016] и в последних модификациях регистратора *ObsDaQ*¹ (версии 5.5 и 5.6).

Для полноты картины упомянем третий способ синхронизации. Этот способ, промежуточный между двумя описанными выше, подробно представлен в [Csontos, Hegytemi, Heilig, 2007]. Суть способа сводится к использованию в модуле АЦП только сигнала синхронизации *PPS*, в то время как регистратор получает оба типа сигналов. Это соответствует использованию трех каналов – *B, C, D* (см. рис. 4). Между модулем АЦП и регистратором сигнал передается блоками без меток времени. Обычно время доставки блока по каналу мало, что гарантирует однозначную установку временной метки в регистраторе.

Ниже приведено описание прототипа системы регистрации односекундных геомагнитных данных с возможностью их передачи в режиме реального времени. На рис. 5 представлены общая схема комплекса регистрации (вверху) и фотография выполненной на ее основе практической реализации магнитной обсерватории (внизу).

¹ URL: <http://www.mingeo.com/prod-obsdaq.html> (дата обращения: 25.02.2020).

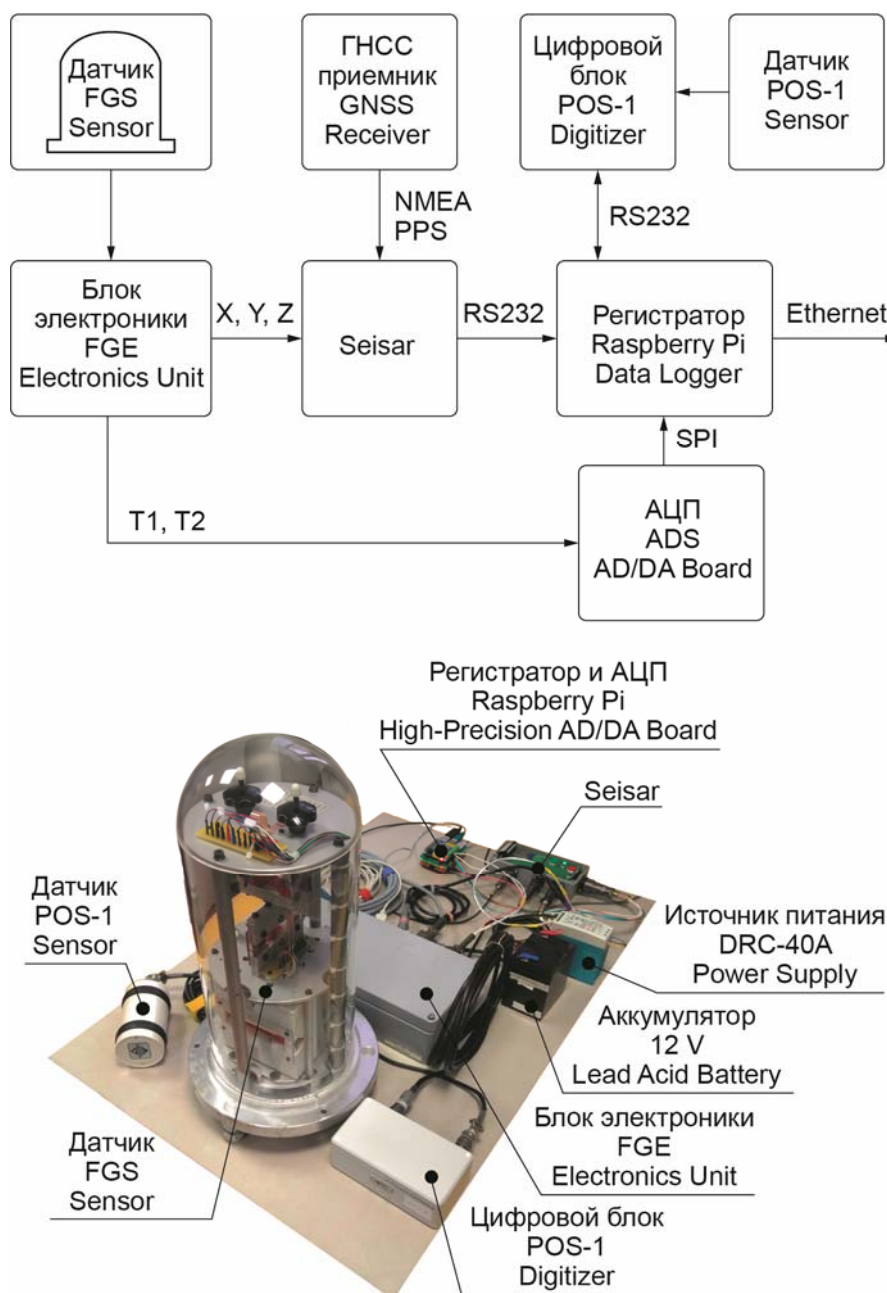


Рис. 5. Общая схема комплекса регистрации (вверху) и фотография выполненной на ее основе практической реализации магнитной обсерватории (внизу)

Fig. 5. General scheme of the registration complex (above) and photograph of the practical implementation of the magnetic observatory made on its basis (below)

Для измерения параметров геомагнитного поля используются векторный магнитометр (вариометр) *FGE* [Pedersen, Merenyi, 2016] с датчиком *FGS* [Fluxgate ..., 2014] и скалярный магнитометр *POS-1* [Sapunov et al., 2001]. В качестве модуля АЦП применен сейсмический регистратор *Seisar-5* [Матвеев, Матвеева, 2017]. Аппаратная реализация регистратора выполнена на основе одноплатного *ARM*-компьютера¹.

¹ URL: <http://www.arm.com/index.php> (дата обращения: 25.02.2020).

В качестве операционной системы выбран один из дистрибутивов *Linux*. При выборе аппаратной платформы для системы регистрации мы исходили из соображений энергоэффективности. С этой точки зрения, используемое нами устройство на основе одноплатного *ARM*-компьютера представляется оптимальным, что не исключает обращения при необходимости к более энергоёмким и более производительным платформам с архитектурой *x86*. Такая ситуация возникает, например, при одновременной регистрации геомагнитных данных и сигналов ГНСС с высокой частотой опроса [Передерин и др., 2018]. В связи с отмеченным для регистратора мы использовали кроссплатформенное программное обеспечение, не зависящее ни от архитектуры компьютера, ни от вида установленной на нём операционной системы.

Вариации компонент поля измеряются вариометром, состоящим из датчика *FGS* и блока усиления *FGE* (см. рис. 5, *вверху*). Аналоговый сигнал выходного каскада усилителя *FGE* подаётся на вход модуля трехканального АЦП *Seisar-5*. Преобразование аналогового сигнала осуществляется микросхемой *ADS1255* (24 разряда) производства *Texas Instruments*¹. Цепи питания аналоговой и цифровой частей модуля разделены, что позволяет добиться крайне низкого уровня пульсаций питания аналоговой части [Матвеев, Матвеева, 2017]. Модуль АЦП подключен к приёмнику ГНСС и получает от него метки и сигналы точного времени (см. рис. 4, каналы *A, B*).

Данные измерений с метками времени передаются регистратору по протоколу *RS232*. По этому же протоколу регистратор взаимодействует с цифровым блоком *POS-1*. Регистратор устанавливает и поддерживает в актуальном состоянии внутренние часы блока, передающего оцифрованные значения параметров магнитного поля с метками времени.

Регистратор реализован на базе одноплатного компьютера *Raspberry Pi*². В качестве накопителя используется карта памяти формата *microSD* объемом до 64 Гб. Энергопотребление регистратора не превышает 4 Вт. Для учета текущей температуры устройства на модуле расширения *Raspberry Pi* установлен дополнительный АЦП.

Электропитание системы осуществляется постоянным током с напряжением 12 В. Источник питания – устройство резервного электроснабжения *DRC-40A*³ – совмещает в себе импульсный преобразователь напряжения из 220 В в 12 В и схему аварийного питания от аккумуляторной батареи. Переключение между источниками электроснабжения выполняется без отключения приборов и остановки регистрации.

Как упоминалось выше, для управления станцией, сбора и передачи данных нами используется одноплатный *ARM*-компьютер. На рынке представлены несколько моделей такого рода систем, и, хотя в [Bracke et al., 2017] приведены аргументы в пользу использования *BeagleBone Black*, мы остановили свой выбор на *Raspberry Pi*, так как в данном случае не видим существенных преимуществ какой-либо из систем.

Выбрано кроссплатформенное программное обеспечение, которое может быть скомпилировано и запущено практически на любом одноплатном компьютере, в том числе и на *BeagleBone Black* (см., например, [Алёшин и др., 2016]).

Основными программными компонентами в составе используемого нами регистратора являются обеспечивающие передачу данных программные модули (плагины для устройств *Seisar* и *POS-1*), *SeedLink*-сервер, а также предназначенная для ведения локального архива утилита *slarchive*. В *IPv4*-сетях связь с центром агрегации осуществляется по защищённому *VPN*-каналу.

¹ URL: <http://www.ti.com/product/ADS1255> (дата обращения: 25.02.2020).

² URL: www.raspberrypi.org (дата обращения: 25.02.2020).

³ URL: <http://www.mean-well.ru> (дата обращения: 25.02.2020).

Передача данных по протоколу *MQTT* организована подобно тому, как это описано в [Bracke et al., 2017]; для этого протокола реализован клиент-публикатор *MQTT publisher*, и в этом случае для взаимодействия с Центром агрегации данных нет необходимости использовать *VPN*-соединение.

Для передачи данных по протоколу *SeedLink* использован специально разработанный программный модуль преобразования в формат *miniSEED* данных, поступающих из АЦП. В качестве сервера *SeedLink* использована реализация из пакета *SeisComp*.

Кроме абсолютного значения геомагнитного поля и вариаций его компонент *SeedLink*-сервер может передавать дополнительную служебную информацию – в нашем случае это необходимые для коррекции показаний вариометра внутренние температуры датчика и электронного блока *FGE*.

Для получения и визуализации данных в реальном времени могут быть использованы открытая программа *GEOPSY*¹, библиотека *OBSPY PYTHON*² или любые другие инструменты, совместимые с протоколом *SEEDLink*.

Заключение

Высокая точность фиксации времени при геомагнитных измерениях может быть достигнута синхронизацией модуля АЦП с сигналами точного времени. Такой подход обеспечивает минимизацию ошибки определения времени по сравнению с другими рассмотренными подходами.

При оперативной передаче данных геомагнитных измерений мы можем рекомендовать использование специализированных протоколов из соображений эффективности использования канала передачи данных и удобства дальнейшей обработки.

Наибольший интерес, на наш взгляд, представляют протоколы *SeedLink* и *MQTT*: использование первого эффективно при передаче данных с высокой частотой дискретизации и равными промежутками между измерениями; второй лучше подходит для передачи результатов отдельных измерений при низких частотах регистрации.

В целом, можно заключить, что *SeedLink*-сервер, дополненный другими инструментами пакета *SeisComp* и сторонними программными продуктами, позволяет построить эффективную, надёжную, несложную в настройке и обслуживании систему передачи геомагнитных данных.

Описанный в статье прототип регистратора – полноценное функционирующее устройство для сбора и передачи результатов геомагнитных измерений в центр агрегации данных с задержками порядка нескольких минут, обеспечивающее достаточный резерв времени для производства любых востребованных на сегодняшний день оперативных продуктов магнитометрических измерений.

Благодарности

Работа выполнена в рамках утвержденных Министерством науки и высшего образования РФ государственных заданий Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН и Геофизического центра РАН.

Авторами использовалась измерительная аппаратура Аналитического центра геомагнитных данных Геофизического центра РАН (<http://ckp.gcras.ru/>).

¹ <http://www.geopsy.org>

² <https://github.com/obspy/obspy/wiki>

Литература

- Алёшин И.М., Бургучев С.С., Передерин Ф.В., Холодков К.И. Универсальная портативная система сбора геофизических данных // Наука и технологические разработки. 2016. Т. 95, № 4. С.31–34.
- Алёшин И.М., Васильев А.Е., Холодков К.И., Передерин Ф.В. Использование технологий виртуальных частных сетей для организации оперативных систем геофизических наблюдений // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50, № 1. С.63–69.
- Алёшин И.М., Гетманов В.Г., Груднев А.А., Добровольский М.Н., Иванов С.Д., Корягин В.Н., Красноперов Р.И., Кудин Д.В., Передерин Ф.В., Соловьёв А.А. Компактное энергоэффективное устройство сбора и оперативной передачи геомагнитных данных // Научное приборостроение. 2018. Т. 28, № 3. С.5–13.
- 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
- Передерин Ф.В., Алёшин И.М., Иванов С.Д., Михайлов П.С., Погорелов В.В., Холодков К.И. Портативный комплекс регистрации сигналов ГНСС с высокой частотой опроса: полевые испытания и перспективы применения // Наука и технологические разработки. 2018. Т. 97, № 4. С.28–40. [Тематический выпуск “Технологии исследования гравитационного поля Земли и повышения точности координатного обеспечения геофизических исследований”]. DOI: 10.21455/std2018.4-2
- Передерин Ф.В., Алёшин И.М., Холодков К.И., Бургучев С.С., Соловьёв А.А. Программная реализация удалённого управления процессами регистрации и оперативной передачи геомагнитных измерений // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52, № 4. С.76–82. DOI: 10.21455/si2016.4-6
- Соловьёв А.А., Лукьянова Р.Ю., Добровольский М.Н., Сидоров Р.В., Красноперов Р.И., Кудин Д.В., Груднев А.А. Сбор и систематизация информации для базы данных об экстремальных геомагнитных природных явлениях // Исследования по геоинформатике. 2017. Т. 5. С.BS5003. DOI: 10.2205/2017BS044
- Aleshin I.M., Burguchev S.S., Kholodkov K.I., Perederin F.V., Soloviev A.A. Software for realtime acquisition of geomagnetic data and station management // Russ. J. Earth. Sci. 2016. V. 16. ES5004. DOI: 10.2205/2016ES000582
- Bracke S., Gonsette A., Rasson J., Poncelet A., Hendrickx O. Automated observatory in Antarctica: real-time data transfer on constrained networks in practice // Geoscientific Instrumentation. Methods and Data Systems. 2017. V. 6, N 2. P.285–292. DOI: 10.5194/gi-6-285-2017
- Chulliat A., Savary J., Telali K., Lalanne X. Acquisition of 1-second data in IGP magnetic observatories // Proceedings of the XIIIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing: U.S. Geological Survey Open-File Report 2009–1226. 2009. P.54–59. DOI: 10.3133/ofr20091226
- Csontos A., Hegymegi L., Heilig B. Temperature tests on modern magnetometers // Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. 2007. V. 99. P.171–177.
- Fluxgate magnetometer. Manual. Technical University of Denmark. 2014. Rev. 01/4-2014.
- INTERMAGNET Technical Reference Manual v4.6 ed.: Benoît St-Louis. 2012.
- Ivanov S.D., Aleshin I.M., Koryagin V.N., Perederin F.V., Kholodkov K. Geophysical Data Aggregation Center IPE RAS // CEUR Workshop Proceedings / Proceedings of the V International Conference Information Technologies in Earth Sciences and Applications for Geology, Mining and Economy (ITES&MP-2019). Moscow, October 14-18. 2019. V. 2527. P.47–51.
- Love J.J. Magnetic monitoring of Earth and space // Physics Today. 2008. V. 61, N. 2. P.31.
- Morschhauser A., Haseloff J., Bronkalla O., Müller-Brettschneider C., Matzka J. A low-power data acquisition system for geomagnetic observatories and variometer stations // Geoscientific Instrumentation. Methods and Data Systems. 2017. V. 6, N 2. P.345–352. DOI: 10.5194/gi-6-345-2017
- Pedersen L.W., Merenyi L. The FGE Magnetometer and the INTERMAGNET 1 Second Standard // J. Ind. Geophys. Union. 2016. V. 2. P.30–36.

- Peltier A., Chulliat A.* On the feasibility of promptly producing quasi-definitive magnetic observatory data // *Earth Planet.* 2010. V. 62, N 2. P. e5–e8. DOI: 10.5047/eps.2010.02.002
- Reda J., Neska M.* The One Second data collection system in Polish geomagnetic observatories // *The Journal of Indian Geophysical Union.* 2016. V. 2. P.62–66.
- Sapunov V., Denisov A., Denisova O., Saveliev D.* Proton and Overhauser magnetometers metrology // *Contributions to Geophysics & Geodesy.* 2001. V. 31, N 1. P.119–124.
- Turbitt C., St-Louis B., Rasson J., Matzka J., Stewart D., Lalanne X., Schwarz G., Shanahan T.* INTERMAGNET Definitive One-second Data Standard // *INTERMAGNET Technical Note TN6.* 2014. V. 1. 7 p.

Сведения об авторах

АЛЁШИН Игорь Михайлович – кандидат физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1; ведущий научный сотрудник, Геофизический центр РАН. 119296, Москва, ул. Молодежная, д. 3. Тел.: +7(499) 254-89-97. E-mail: ima@ifz.ru

ИВАНОВ Станислав Дмитриевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-89-97. E-mail: f0ma@ifz.ru

КОРЯГИН Владимир Николаевич – кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-89-97. E-mail: vlad@ifz.ru

МАТВЕЕВ Игорь Владимирович – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-83-42. E-mail: igormat954@mail.ru

ПЕРЕДЕРИН Фёдор Викторович – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-89-97. E-mail: crash@ifz.ru

СОЛОВЬЁВ Анатолий Александрович – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, директор, Геофизический центр РАН. 119296, Москва, ул. Молодежная, д. 3; главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(495) 930-05-46. E-mail: soloviev@gcras.ru

ХОЛОДКОВ Кирилл Игоревич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-89-97. E-mail: keir@ifz.ru

IT-INFRASTRUCTURE OF GEOMAGNETIC OBSERVATORY NETWORK

I.M. Aleshin^{1,2}, S.D. Ivanov¹, V.N. Koryagin¹, I.V. Matveev¹, F.V. Perederin¹,
A.A. Soloviev^{1,2}, K.I. Kholodkov¹

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² The Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The purpose of the presented research is the development of a modern information infrastructure for a regional (or a segment of a global) network of geomagnetic observatories, allowing to automate the acquisition,

storage and distribution of measurement data as much as possible, including their transmission in real time. We discuss the solution for a number of tasks necessary for the implementation of such a system. In particular, a number of technical aspects of developing a system for geomagnetic data acquisition such as accuracy of the time stamp setting and the choice of a protocol for operational transfer of measurements, including in real time are considered.

SeedLink protocol is compared to *MQTT* protocol with detailed description. The paper also includes the implementation of infrastructure for operational acquisition of geomagnetic measurement results based on the *SeedLink* protocol. Besides, there is a brief description of the structure of the Data Aggregation Center and a review of a functioning model of a geomagnetic observatory with *FGE* and *POS-1* measuring devices, ADC module *Seisar-5* and a data logger based on a single-board computer.

Keywords: INTERMAGNET, one-second data logging, operational data transfer, *SeedLink*, *MQTT*, geomagnetic observatory.

References

- Aleshin I.M., Burguchev S.S., Kholodkov K.I., Perederin F.V., Soloviev A.A., Software for realtime acquisition of geomagnetic data and station management, *Russ. J. Earth. Sci.*, 2016, vol. 16, no. 5, ES5004. DOI: 10.2205/2016ES000582
- Aleshin I.M., Burguchev S.S., Perederin F.V., Kholodkov K.I., Versatile Geophysical Data Acquisition System, *Seismic Instrument*, 2018, vol. 54, no. 5, pp. 562-564.
- Aleshin I.M., Getmanov V.G., Grudnev A.A., Dobrovolsky M.N., Ivanov S.D., Koryagin V.N., Krasnopetrov R.I., Kudin D.V., Perederin F.V., Soloviev A.A., Kholodkov K.I., Compact energy efficient online data logger for real time geomagnetic measurements, *Nauchnoe priboroostroenie*, 2018, vol. 28, no. 3, pp. 5-13.
- Aleshin I.M., Vasiliev A.E., Kholodkov K.I., Perederin F.V., Virtual private network technologies in real-time geophysical data collection systems, *Seismic Instruments*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 44-47.
- Bracke S., Gonsette A., Rasyon J., Poncelet A., Hendrickx O., Automated observatory in Antarctica: real-time data transfer on constrained networks in practice, *Geoscientific Instrumentation. Methods and Data Systems*, 2017, vol. 6, no. 2, pp. 285-292.
- Chulliat A., Savary J., Telali K., Lalanne X., Acquisition of 1-second data in IGP magnetic observatories, *Proceedings of the XIIIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing*: U.S. Geological Survey Open-File Report 2009-1226, 2009, pp. 54-59. DOI: 10.3133/ofr20091226
- Csontos A., Hegyemegi L., Heilig B., Temperature tests on modern magnetometers. / *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.* 2007, vol. 99, pp. 171-177.
- Fluxgate magnetometer. Manual. Technical University of Denmark, 2014. Rev. 01/4-2014.
- INTERMAGNET Technical Reference Manual v4.6 ed.: Benoît St-Louis., 2012.
- Ivanov S.D., Aleshin I.M., Koryagin V.N., Perederin F.V., Kholodkov K.I., Geophysical Data Aggregation Center IPE RAS, *CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the V International Conference Information Technologies in Earth Sciences and Applications for Geology, Mining and Economy (ITES&MP-2019) Moscow, October 14-18, 2019*, vol. 2527, pp. 47-51.
- Love J.J., Magnetic monitoring of Earth and space, *Physics Today*, 2008, vol. 61, no. 2, p. 31.
- Matveev I.V., Matveeva N.V., SEISAR-5 Portable Seismic Recorder with Low Energy Consumption for Autonomous Operation in Harsh Climatic Conditions, *Seismic Instruments*, 2018, vol. 54, no. 6, pp. 626-630. DOI: 10.3103/S0747923918060087
- Morschhauser A., Haseloff J., Bronkalla O., Müller-Brettschneider C., Matzka J., A low-power data acquisition system for geomagnetic observatories and variometer stations, *Geoscientific Instrumentation. Methods and Data Systems*, 2017, vol. 6, no. 2, pp. 345-352.
- Pedersen L.W., Merenyi L., The FGE Magnetometer and the INTERMAGNET 1 Second Standard, *J. Ind. Geophys. Union*, 2016, vol. 2, pp. 30-36.
- Peltier A., Chulliat A., On the feasibility of promptly producing quasi-definitive magnetic observatory data, *Earth Planet*, 2010, vol. 62, pp. e5-e8. DOI: 10.5047/eps.2010.02.002
- Perederin F.V., Aleshin I.M., Ivanov S.D., Mikhailov P.S., Pogorelov V.V., Kholodkov K.I., Portable GNSS Signal Recording System with a High Sampling Rate: Field Tests and Application Forecasts, *Seismic Instruments*, 2019, vol. 55, no. 6, pp. 720-726. DOI: 10.3103/S0747923919060069

- Perederin F.V., Aleshin I.M., Kholodkov K.I., Burguchev S.S., Soloviev A.A., Software implementation of remote operation of the recording and real time transmission of geomagnetic data, *Seismicheskie pribory* (Seismic Instruments), 2016, vol. 52, no. 4, pp. 76-82. [in Russian].
- Reda J., Neska M., The One Second data collection system in Polish geomagnetic observatories, *The Journal of Indian Geophysical Union*, 2016, no. 2, pp. 62-66.
- Sapunov V., Denisov A., Denisova O., Saveliev D., Proton and Overhauser magnetometers metrology, *Contributions to Geophysics & Geodesy*, 2001, vol. 31, no. 1, pp. 119-124.
- Soloviev A.A., Lukianova R.Y., Dobrovolsky M.N., Sidorov R.V., Krasnoperov R.I., Kudin D.V., Grudnev A.A., Acquisition and systematization of information for database on extreme geomagnetic conditions, *Geoinformatics research papers*, 2017, vol. 5, BS5003, DOI: 10.2205/2017BS044
- Turbitt C., St-Louis B., Rasson J., Matzka J., Stewart D., Lalanne X., Schwarz G., Shanahan T., INTERMAGNET Definitive One-second Data Standard, *INTERMAGNET Technical Note TN6*, 2014, vol. 1, 7 p.