

Новейший российский аппаратурно – программный комплекс для магнитотеллурических зондирований «SMT-32»

■ Куклина Ф.Р.¹, к.г.-м.н. Семинский И.К.^{1,2}, Немцева Д.Б.¹, Гомульский В.В.¹, Давыденко С.А.^{1,2}, Шарлов М.В.³, к.т.н. Агафонов Ю.А.¹

¹ – ООО «СИГМА-ГЕО», г. Иркутск,

² – ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск,

³ – ООО «СИГМА-ЭЛЕКТРОНИКА», г. Иркутск

Методы электроразведки позволяют решать широкий спектр геологических задач в диапазоне глубин от первых метров до десятков километров, при глубинных исследованиях (более ≈ 8 км) наиболее эффективным считается метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ). МТЗ позволяет получать геолого-геофизическую информацию не только в пределах земной коры, но и исследовать мантию и ядро планеты, а также вести мониторинг напряженно-деформированного состояния горных пород. МТЗ – метод естественного переменного электромагнитного поля, является разновидностью индукционного частотного зондирования [Дмитриев и др., 1944].

Несмотря на высокий уровень электроразведки, исследования многих перспективных участков пока ограничивались региональной стадией изучения [Pospeev, Seminskiy, Nemtseva, 2021]. Предполагается, что одним из факторов, снижающих популярность применения магнитотеллурических исследований, является узкий рынок приборной базы геофизического оборудования. Наиболее известными производителями магнитотеллурических программно-аппаратурных комплексов на мировом рынке являются: Phoenix Geophysics (Канада), Metronix (Германия) и LEMI (Украина). Среди отечественных приборов известна МТ-станция NORD (ООО «Северо-Запад»). В связи со сложившимися геополитическими условиями, импортное оборудование стало труднодоступным и, не смотря на наличие отечественных аналогов, остается дефи-

цит доступных и удобных в использовании приборов. Также, ввиду актуальности изучения напряженно-деформированного состояния горных пород сейсмически активных регионов, ощущается нехватка модифицированного для мониторинговых наблюдений магнитотеллурического оборудования. Иными словами, расширение отечественного рынка геофизического оборудования для МТЗ является актуальной задачей геофизической отрасли страны.

Аппаратурно-программный комплекс SMT-32 для МТЗ

С 2000-ых годов коллектив компании «СИГМА-ЭЛЕКТРОНИКА» (г. Иркутск, Россия) занимается производством геофизического оборудования для электроразведки. Наиболее известны аппаратурно-программные продукты для ЗСБ (зондирование становлением поля в ближней зоне): SGS-TEM (диапазон исследуемых глубин - от 200 м до 7 км) и FastSnap (диапазон исследуемых глубин - от 2 м до 1 км). В 2021 году «СИГМА-ЭЛЕКТРОНИКОЙ» в рамках импортозамещения создан новый аппаратурно-программный комплекс для магнитотеллурических измерений – SMT-32. Данный комплекс производит регистрацию магнитных (H_x , H_y , H_z) и электрических (E_x , E_y , для мониторинговых измерений оснащается шестым каналом – E_z) компонент естественного поля Земли. Прибор позволяет проводить измерения не только в пределах частот, типичных для глубинного магнитотеллурического зондирования



▲ Рис. 1. Комплект аппаратно-программного комплекса SMT-32:
 А – цифровой регистратор МТ-поля SMT-32; Б – кабель питания;
 В – антенна GPS/GLONASS с разъемом BNC; Г – кабель-удлинитель для подключения индукционного датчика; Д – электрические линии; Е – кабель-разветвитель для подключения до трех индукционных датчиков; Ж – батарея 12 В; З – Wi-Fi-антенна; И – неполяризуемый электрод для заземления электрических линий; К – индукционные датчики [Паспорт на ..., 2022].

(0.0001 – 400 Гц), но и в аудио диапазоне (АМТЗ) (1 – 10000 Гц) (Таблица 1) [Паспорт на ..., 2022], что расширяет спектр решаемых задач на всех этапах геологоразведочных работ: региональном, поисково-оценочном, а также разведочном.

В комплект SMT-32 входят: измеритель, три индукционных датчика для регистрации магнитных компонентов, две электрические линии, неполяризуемые электроды для регистрации электрических компонентов, аккумулятор 12 В, обеспечивающий питание станции, внешняя GNSS-антенна (GPS/GLONASS), предназначенная для определения точного времени (необходимо для синхронизации наблюдений) и координат. Все перечисленные выше устройства подключаются непосредственно к измерителю (Рис. 1).

Конструктивно, измеритель SMT-32 представляет собой автономный прибор, комбинирующий измерительные каналы на базе прецизионных 32-разрядных АЦП и управляющий мини-компьютер. Это позволяет просматривать и контролировать измеряемые сигналы в период регламентных или полевых работ. Для удобства работы и настройки измеритель позволяет подключать периферийные устройства, такие как монитор, внешний USB накопитель, мышь и клавиатура. Также возможно подключение к измерителю удаленно, через Wi-Fi соединение.

Цифровой регистратор SMT-32 обладает упрощенным файлообменом, который реализуется посредством подключения и автоматической записи полученного

№	Параметр	Величина
1	Тип регистрирующей станции (измерителя)	цифровая, 32-х разрядная;
2	Частотный диапазон измерителя	10000-0,0001Гц;
3	Измеряемые параметры	$E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$;
4	Рабочий диапазон температур	от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$... $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$;
5	Рабочая влажность	0 – 95% (при отсутствии сплошной пленки воды);
6	Входное сопротивление станции для электрических каналов составляет	20 МОм;
7	Частота дискретизации сигнала	Гц – 24000, 2400, 150, 15 (возможен режим сохранения недецимированного поля на частоте 24000 и 2400 Гц);
8	Фильтрация	Настраиваемые цифровые децимирующие ФНЧ; режекторные фильтры 50/60 Гц;
9	Память для сохранения данных	128 Гб;
10	Подключение к измерителю, управление, передача данных	Wi-Fi; высокоскоростной USB разъём; подключение HDMI;
11	Габариты	22×25,5×9,5 см;
12	Масса	2 кг;
Электрические каналы		
13	Форм-фактор	Совмещены с регистратором;
14	Входное сопротивление	Не менее 20 МОм;
15	Усиление	1-64;
Магнитные каналы		
16	Форм-фактор	Совмещены с регистратором;
17	Усиление	1-64.

▲ Табл. 1. Ключевые технические характеристики аппаратуры SMT-32.

материала на USB-накопитель, а также возможности Wi-Fi подключения. Удобная световая индикация статуса станции (процесс регистрации, режим ожидания или скачивание данных с прибора) упрощает работу с ней в поле. Ещё одним из преимуществ является возможность работы в различных климатических условиях – от арктических до субтропических, а компактные размеры приборов позволяют повысить мобильность полевых подразделений.

Аппаратурный комплекс оснащен программой регистрации SMT32, которая позволяет задавать параметры измерительных каналов (частотный диапазон, коэффициент усиления, аппаратные и децимирующие фильтры и др.) и осуще-

ствлять сбор данных в широком временном диапазоне (максимальное время записи ограничено размером подключенного накопителя). За счет интуитивно понятного интерфейса обеспечивается быстрое обучение операторов-геофизиков работе со станцией.

Пылевлагозащищенный корпус обеспечивает оптимальный режим работы встроенных электронных компонентов и служит для защиты от внешних воздействий окружающей среды. Станция позволяет удаленно производить сбор и контроль данных при наличии Интернет-соединения. Описываемая аппаратура имеет конструкцию, компоненты которой не оказывают вредного влияния на окружающую среду.

Выходными данными регистрации является пакет файлов с расширением: «.xml» (информационный файл о параметрах регистрации), «.txt» (информация о состоянии станции в процессе регистрации) «.ini» (копия файла STARTUP с параметрами запуска станции) и бинарные файлы (полевые записи). Для обработки МТ-данных возможно использование программного обеспечения Epi-KIT [Епишкин, Яковлев, Андреев, 2015] и MT-Corrector, в результате конвертируется файл формата «.edi». Количественная интерпретация кривых зондирования может осуществляться в любом, предназначенном для этого, программном комплексе.

Сопоставление результатов регистрации магнитотеллурическими станциями SMT-32 и Phoenix Geophysics MTU-5

Ключевым этапом проверки работоспособности и соответствия аппаратуры заявленным требованиям и характеристикам является проверка на идентичность работы станции с эталоном.

Проверка аппаратурно-программного комплекса SMT-32 осуществлялась путем оценки идентичности работы вышеуказанной станции с эталоном, в данном случае – с канадской станцией Phoenix Geophysics MTU-5. Испытания проводились в геологических условиях Прибайкалья, на территории с низким уровнем промышленных помех.

Опытно-методические работы выполнялись в соответствии с «Инструкцией по электроразведке» [Инструкция по электроразведке, 1984] и инструктивно-методическими материалами к электроразведочным станциям SMT-32 и Phoenix Geophysics MTU-5. Измерение компонента магнитотеллурического поля производилось по методике точечных зондирований с использованием пятиканальной установки (Рис. 2).

Для оценки идентичности работы станций SMT-32 и Phoenix Geophysics MTU-5 велась одновременная регистрация МТ-поля в течение 24 часов (диапазон частот 200-0,001 Гц), длина электрических диполей по 50 м.

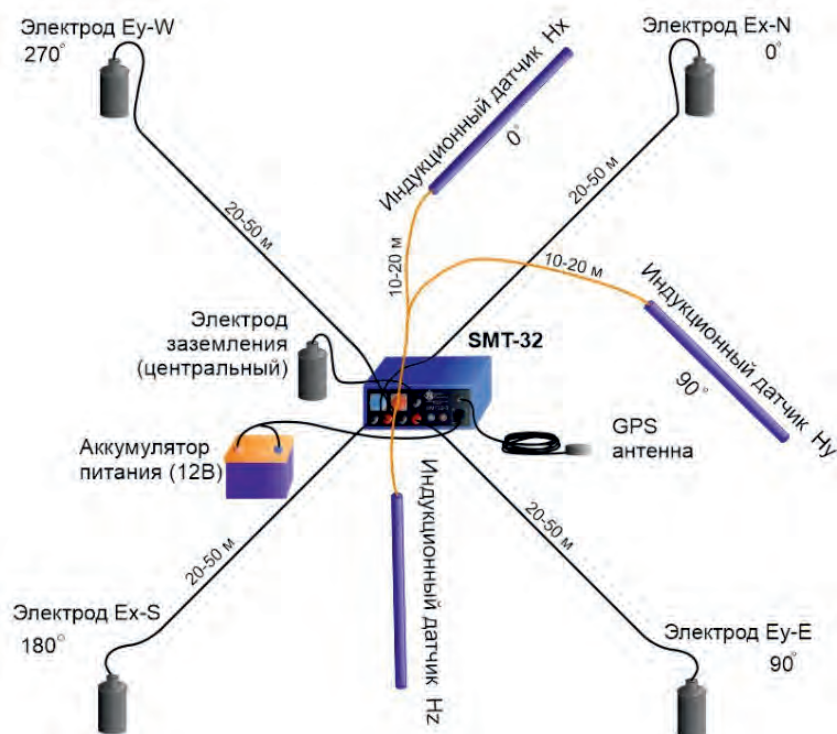
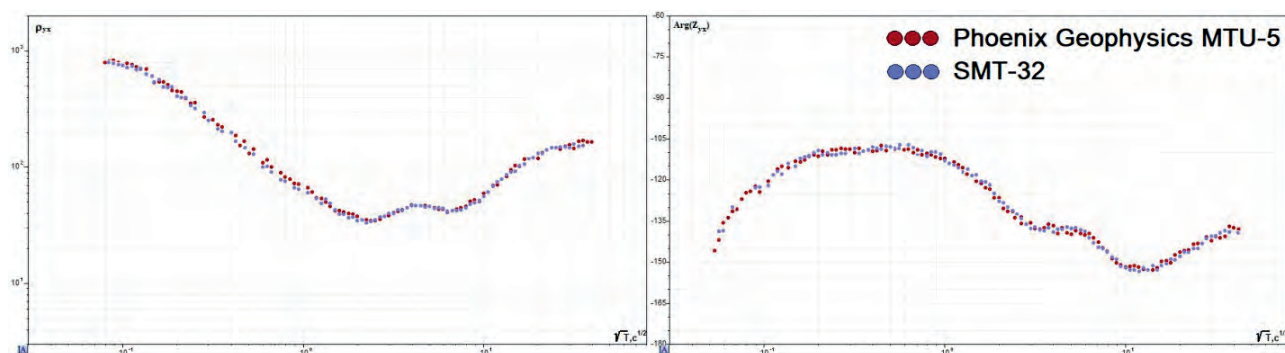


Рис. 2. Схема установки МТЗ SMT-32.



▲ Рис. 3. Кривые МТЗ, полученные в результате оценки идентичности работы станций SMT-32 и Phoenix Geophysics MTU-5 на территории Прибайкалья: слева – кажущееся сопротивление; справа – фазовая составляющая.

Результаты обработки и анализ полученных данных показали хорошее качество, которое соответствовало требованиям инструкции. Кривые зондирования сходились как по амплитудной, так и по фазовой составляющей. Дисперсия, наблюдаемая на поздних и средних временах, считается типичной для оцениваемого временного диапазона (Рис. 3). Среднее квадратическое расхождение амплитудных (5%) и фазовых (1-5°) кривых не превышает допуска, предусмотренного «Инструкцией по электроразведке» [Инструкция по электроразведке, 1984].

Применение аппаратурно-программного комплекса SMT-32 при региональных электромагнитных исследованиях в северо-восточной части Сибирской платформы

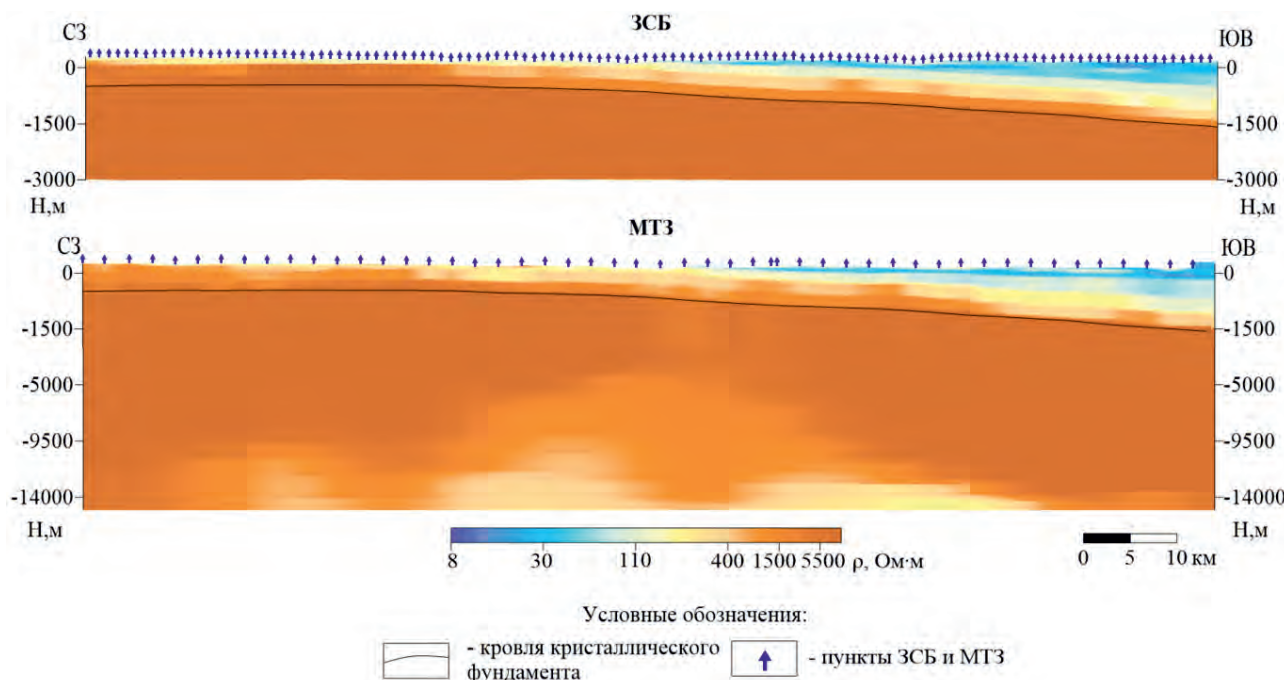
Ещё одним показательным примером работы станции является сравнение результатов, полученных при выполнении комплекса электроразведочных работ методами зондирования становлением поля в ближней зоне и магнитотеллурического зондирования.

Исследования проводились на этапе регионального изучения Мунского свода Анабарской антеклизы в области сочленения с Вилюйской синеклизой. Изучаемый район характеризуется малой

степенью изученности методами электроразведки, вследствие чего не имеет априорной геоэлектрической модели. Актуальность исследования данной территории обусловлена вероятной нефтегазоносностью венд-кембрийского комплекса. Работы методом МТЗ проводились совместно с исследованиями ЗСБ. Шаг наблюдений МТЗ по профилю составлял 2500 м, ЗСБ - 500 м. В результате работ МТЗ и ЗСБ были получены разрезы удельного электрического сопротивления (УЭС), представленные на рисунке 4.

В ходе сопоставления результатов МТЗ и ЗСБ отмечается принципиальная схожесть геоэлектрических моделей. На разрезах прослеживаются области увеличения мощности осадочного чехла в южном направлении. По результатам интерпретации видно, что метод ЗСБ обладает повышенной чувствительностью к изменению геоэлектрических параметров разреза и позволяет дифференцировать более тонкие и менее контрастные слои. В свою очередь МТЗ не обладает такой разрешающей способностью, однако оно эффективнее в глубинной части, в частности при изучении строения кристаллического фундамента.

Таким образом, проведенные исследования позволяют не только просле-



▲ Рис. 4. Геоэлектрические разрезы УЭС по результатам ЗСБ и МТЗ.

дить геолого-геоэлектрическое строение исследуемого участка, но и судить об эффективности работы аппаратуры SMT-32 путем сопоставления результатов, полученных посредством МТЗ и ЗСБ.

Мониторинговые (непрерывные) магнитотеллурические наблюдения

Особенностью станции SMT-32 является возможность оснащения её дополнительными измерительными каналами и настройкой непрерывных мониторинговых измерений естественного магнитотеллурического поля с целью оценки изменений напряженно-деформированного состояния пород сейсмически активных районов. Применительно к мониторинговым наблюдениям, прибор оснащается шестым каналом для регистрации вертикальной компоненты E_z , которая чувствительна к неоднородности геоэлектрического разреза. Также существует возможность добавления дополнительных каналов для подключения к станции сейсмоприёмников, что позволит одновременно регистрировать сейсмическое и магнитотеллурическое поле.

С помощью магнитотеллурического мониторинга решаются следующие задачи:

1. Выявление среднесрочных предвестников землетрясений – посредством измерения электропроводности в пределах сейсмогенерирующего слоя. Активизация флюидодинамической системы вероятна в пределах глубин залегания корового проводящего слоя, вследствие увеличения горного давления в процессе подготовки землетрясения.

2. Выявление краткосрочных предвестников землетрясений – изменений характера поведения вертикальной компоненты электротеллурического поля, которая чувствительна к проявлению пикового напряжения в виде пьезоэлектрических, электрокинетических и прочих эффектов.

Модифицированная для мониторинга напряженно-деформированного состояния горных пород МТ-станция успешно испытывалась на территории Прибайкалья в области пересечения Приморского и Морского разломов. Показательным результатом работы станции было выяв-

ление изменения электропроводности в пределах сейсмогенерирующего слоя (10-20 км), произошедшее вследствие сейсмической активизации. Последующее сейсмическое событие повлекло завершение этой активизации, а возросшая электропроводность постепенно вернулась к исходному уровню [Семинский, Поспеев, 2022].

Заключение

Показаны применимость и преимущества отечественного аппаратурно-программного комплекса SMT-32 для магнитотеллурических зондирований, разработанного компанией «СИГМА-ЭЛЕКТРОНИКА», в области изучения глубинного строения и вариаций магнитотеллурического поля Земли.

Проведённые опытно-методические испытания и тесты на идентичность показали, что работа отечественной станции идентична выбранному эталону (канадской станции Phoenix Geophysics MTU-5), а качество полученного полевого материала соответствует инструктивным требованиям и оценивается как высокое.

Полученные результаты методами ЗСБ и МТЗ на территории Восточной Сибири демонстрируют эффективность применения станции SMT-32 при изучении глубинного геоэлектрического строения осадочных и кристаллических отложений.

Литература

1. Дмитриев В.И., Яковлев А.Г., Голубцова Н. С., Пушкарев П. Ю., Куликов В.А., Хмелевской В.К., Шустов Н.Л. Магнитотеллурический метод и научная школа геофизиков МГУ. I - с. 80-98. 2014 г.
2. Епишкин Д.В., Яковлев Д.В., Андреев М.А. Программа обработки данных магнитотеллурических зондирований EPI-kit. – 2015.
3. Инструкция по электроразведке. Наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудничная электроразведка, аэроэлектроразведка, морская электроразведка. Л.: Недра, 1984. -534 с.
4. Паспорт на техническое изделие. Цифровой регистратор МТ- поля 5-канальный SMT 32-5. 14 с. 2022 г.
5. Pospееv A.V., Seminskiy I.K., Nemtseva D.B. First results of soundings for mapping the riphean sediments of The Baikal Foredeep. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2021; 12(3S):769-775. (In Russ.) DOI.org/10.5800/GT-2021-12-3s-0553
6. Семинский И.К., Поспеев А.В. Отражение крупных для Байкальского рифта землетрясений 2020-2021 г. в данных режимных наблюдений магнитотеллурического поля земли // *Физика Земли*. -2022. №4. с. 46-55. DOI: 10.31857/S0002333722040093