

ИЗМЕРЕНИЯ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ДИАПАЗОНЕ НИЗКИХ ЧАСТОТ

© 2019 Д.С. Тягунов

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича
УрО РАН, Екатеринбург, Россия, 620016; e-mail: tds-07@mail.ru*

В статье приводятся результаты измерений вариаций геомагнитного поля, полученные магнитометрами, разработанными в Институте геофизики УрО РАН, имеющими разный диапазон частот (0.01–200 Гц и 0.01–30 Гц). Установлено, что чувствительность и разрешающая способность применяемой в работе аппаратуры достаточна для исследования вариаций геомагнитного поля на низких частотах. Показано, что магнитометры, используемые магнитомодуляционные преобразователи с автопараметрическим усилением сигнала способны фиксировать вариации геомагнитного поля, не превышающие уровень геомагнитного шума 0.2 пТл на частоте 2 Гц и 1 пТл на более низких частотах. Средняя амплитуда вариаций геомагнитного поля составляющих магнитной индукции, зафиксированная прибором с диапазоном частот 0.01–200 Гц во всей полосе пропускания в два раза превышает среднюю амплитуду составляющих магнитной индукции, зафиксированная прибором с диапазоном частот 0.01–30 Гц, однако спектральный состав имеет близкие значения.

Ключевые слова: геомагнитный шум, магнитная индукция, магнитное поле.

ВВЕДЕНИЕ

Опыт магнитотеллурических исследований показывает, что наиболее полную информацию при изучении электромагнитных полей, возможно, получить только с использованием компонентных измерений электромагнитного поля (Metronix, 2019; Phoenix, 2019). При измерении компонент переменного электромагнитного поля желательно устанавливать порог чувствительности измерительного зонда на уровне его шумов в исследуемой области сигналов. Предельный уровень шумов, достижимых в настоящее время, рассматривается для каждого типа регистрации отдельно и устанавливается не ниже, чем принимаемый для аппаратуры магнитотеллурических зондирований.

По данным (Поляков и др., 2016; Сокол-Кутыловский, 2010; Сокол-Кутыловский, Тягунов, 2007) чувствительность датчиков при измерении переменного слабого магнитного поля в диапазоне низких частот должна быть не хуже аналогично принятой для аппаратуры магнитотеллурического зондирования. Коэффициент преобразования при относительных

измерениях постоянного магнитного поля определяется динамическим диапазоном измерения и установлен на уровне 0.2 мВ/нТл.

Основным инструментом измерения слабого магнитного поля низких частот в настоящее время остаются индукционные датчики вследствие их простоты и надежности. В работе (Поляков и др., 2016) показано, что попытки применения других типов датчиков для измерения компонент магнитной индукции не приводят к полноценной замене индукционных датчиков. Индукционные преобразователи позволяют проведение компонентных измерений, но имеют различную чувствительность на различных измеряемых частотах. Для увеличения чувствительности индукционных датчиков требуют либо существенного увеличения размеров датчика (что не соответствует требованиям малых габаритов измерительного датчика), либо применения ферромагнитных сердечников, которые вносят дополнительные погрешности за счет подмагничивания сердечника внешним магнитным полем. У феррозондовых преобразователей при измерениях

магнитного поля в области частот ниже 20 Гц заметно возрастают собственные шумы ферромагнитного измерительного датчика. К тому же феррозонды потребляют значительную энергию накачки и имеют недостаточный порог чувствительности. Сверхчувствительные магнитометры (СКВИД-магнитометры), используемые для измерения очень слабых магнитных полей до сих пор остаются слишком дороги в эксплуатации (Афанасьев и др., 1972, 1979). Поэтому для измерения вариаций слабого магнитного поля низких частот более эффективным представляется использовать магнитомодуляционный преобразователь на основе аморфных ферромагнитных сердечников с компенсированной продольной магнитострикцией (Сокол-Кутыловский, 2010; Сокол-Кутыловский, Тягунов, 2007).

Целью настоящей работы является показать преимущества магнитомодуляционных преобразователей магнитной индукции перед индукционными датчиками для измерения сигналов слабого магнитного поля низких частот. Использование магнитомодуляционных преобразователей, в сравнении их с индукционными датчиками при геолого-геофизических исследованиях, обусловлено их низким порогом чувствительности, малогабаритными характеристиками и весом, экономией трудозатрат на процедуру их установки на месте проведения съемки.

Также, применение магнитомодуляционных преобразователей при геолого-геофизических исследованиях облегчает проведение крупномасштабной сети наблюдений за вариациями геомагнитного поля, изучение которых необходимо, например, чтобы строить геоэлектрические разрезы, по которым можно определить

проводящие зоны проекции их на дневную поверхность Земли; исследовать частотный состав магнитного поля Земли в диапазоне пульсаций для определения интенсивности геомагнитного поля и его структуры.

Поскольку хорошо известно, что уровень антропогенных шумов в городах значительно превышает вариации естественного электромагнитного поля Земли, то измерения трех компонент (B_x , B_y , B_z) геомагнитного поля низких частот проводились в Артинском районе Свердловской области (рис. 1), в котором величина геомагнитного шума в тысячи раз меньше антропогенных шумов (Тягунов, 2017, 2018).

Под вариациями геомагнитного поля в работе понимаются непрерывные колебания естественного магнитного поля Земли, генерирующиеся в диапазоне частот от сотен герц до тысячных долей герца.

ИСПОЛЬЗУЕМАЯ АППАРАТУРА

На сегодняшний день индукционные датчики разными компаниями представлены на рынке достаточно широко. Серийно их выпускают немецкая фирма Metronix, канадская компания Phoenix Geophysics, американская фирма Schlumberger, Львовский центр Института космических исследований НАН Украины (Поляков и др., 2016).

Наиболее востребованными в проведении исследовательских и поисковых работ при решении геолого-геофизических задач оказались индукционные датчики немецкой фирмы Metronix и канадской компании Phoenix Geophysics.

Немецкая фирма Metronix (Metronix, 2019) предлагает линейку из двух широкополосных

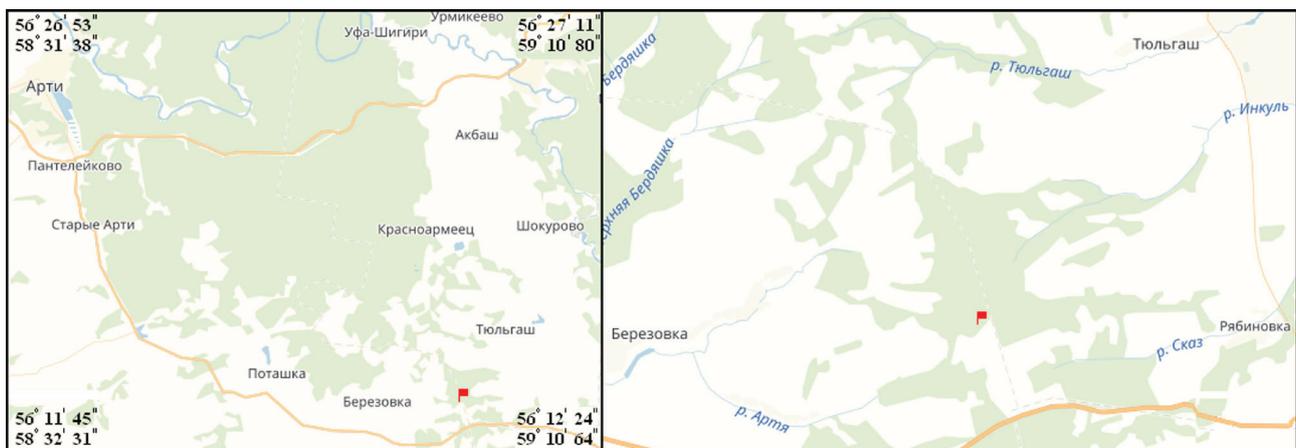


Рис. 1. Фрагмент карты Артинского района Свердловской области с местоположением измерений. В левом окне рисунка общий фрагмент местности, в правом детализированный. Флажком отмечено место измерения.

Fig. 1. A part of the map of the Artinsky district in Sverdlovsk region with the zone of measurements. The left window of the figure shows the general part of the zone, the detailed part is in the right part. The flag denotes the place of measurement.

датчиков: низкочастотного датчика MFS-06 и высокочастотного MFS-07, предназначенные для измерений в диапазоне звуковых частот и зондирования Земли в диапазоне звуковых частот с управляемым источником. Сведения о датчиках фирмы Metronix приведены в (табл. 1).

Индукционные магнитометры канадской компании Phoenix Geophysics (Phoenix, 2019) представлены низкочастотным МТС-50Н и высокочастотным АМТС-30 типами датчиков, предназначенные для работы в составе магнитотеллурических установок производства этой же компании. Сведения о датчиках компании Phoenix Geophysics приведены в (табл. 2).

Как было сказано, использование индукционных датчиков при их больших габаритах и массе, кроме того, требуют весьма трудоемкой и нетехнологичной процедуры установки на месте измерения. В связи с этим вместо индукционных датчиков нами были использованы магнитомодуляционные преобразователи магнитной индукции, предназначенные для измерения сигналов слабого магнитного поля низких частот, разработанных в Институте геофизики УрО РАН. В качестве датчиков магнитного поля этих магнитометров используется магнитомодуляционный преобразователь с автопараметрическим усилением измеряемого сигнала. Датчики выполнены на основе аморфных ферромагнитных сердечников с компенсированной продольной магнитострикцией, работающих на основной частоте возбуждения. На каждом комплекте аппаратуры содержится три независимых взаимно-ортогональных канала измерения компонент магнитной индукции с порогом чувствительности 0.1 пТл. Как показано в работе (Сокол-Кутыловский, Тягунов, 2007) величина собственного магнитного шума автопараметрического преобразователя магнитной индукции

не превышает $5 \text{ пТл} \times \text{Гц}^{-1/2}$ в диапазоне частот от 0.1 Гц до 1 кГц.

При проведении измерений геомагнитного поля использовалось два комплекта аппаратуры. Диапазон частот измеряемого сигнала первого комплекта аппаратуры 0.01÷30 Гц при коэффициенте преобразования без внешнего усиления 0.2 мВ/нТл. Диапазон частот измеряемого сигнала второго комплекта аппаратуры 0.01÷200 Гц при коэффициенте преобразования без внешнего усиления 7.5 мВ/нТл (при таком коэффициенте преобразования максимальная амплитуда измеряемого магнитного поля ограничена на уровне ± 1300 нТл, но в магнитометре имеется возможность измерения более интенсивного магнитного поля с меньшим коэффициентом преобразования). Выходные сигналы каждой из компонент магнитной индукции подавались на многоканальный 24-х разрядный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) AD7734, который имеется в каждом комплекте аппаратуры и управляемый переносными компьютерами (использовались два ноутбука). Массив цифровых данных, записанных за время измерения, накапливался и сохранялся в память компьютера в отдельном текстовом файле.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

При измерении амплитуды геомагнитного поля в окрестностях д. Рябиновка и д. Березовка Артинского района Свердловской области (рис. 1) одна из горизонтальных компонент V_x с помощью компаса была направлена по магнитному меридиану, составляющая магнитной индукции V_z устанавливалась по вертикали. Выравнивание составляющих V_x и V_y относительно горизонтальной плоскости осуществлялось с помощью

Таблица 1. Технические характеристики датчиков фирмы Metronix.

Table 1. Technical specifications of the Metronix sensors.

Датчик MFS-06	
Частотный диапазон	от 0.0001 Гц до 10 кГц
Собственный шум	Сверхнизкий
Встроенная калибровка	Есть
Длина	1250 мм
Диаметр	75 мм
Вес	8.5 кг
Предназначение	
Датчик MFS-07	
Частотный диапазон	от 0.001 Гц до 50 кГц
Собственный шум	Низкий
Встроенная калибровка	Есть
Длина	800 мм
Диаметр	75 мм
Вес	5.5 кг

Таблица 2. Технические характеристики датчиков компании Phoenix Geophysics.**Table 2.** Technical specifications of the Phoenix Geophysics sensors.

Датчик МТС-50Н	
Частотный диапазон	от 0.00002 Гц до 400 Гц
Встроенная калибровка	Есть
Длина	1410 мм
Диаметр	60 мм
Вес	8 кг
Датчик АМТС-30	
Частотный диапазон	от 1 Гц до 10 кГц
Встроенная калибровка	Есть
Длина	820 мм
Диаметр	60 мм
Вес	3 кг

уровня, встроенного в корпус датчиков. Чтобы исключить взаимовлияние аппаратуры, датчики были разнесены друг от друга на расстояние 3 м. Следует отметить, что при проведении магнитометрических измерений, чтобы сгладить вибрацию, датчик закрепляют на немагнитном штативе. При проведении данных измерений датчики обоих комплектов погружались в землю (предварительно выкапывались две ямки размерами 30×30 см и глубиной 30 см), выравнивались и сверху закрывались напольной кафельной плиткой. Образовавшиеся при этом щели между плиткой и поверхностью земли присыпались дернистой землей. Измерения проводили при отсутствии заметных возмущений геомагнитного поля и ветра, опираясь на прогноз К-индексов геомагнитной активности публикуемые Институтом Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, а также гидрометцентра г. Екатеринбурга Свердловской области. Время непрерывной регистрации сигнала геомагнитного шума в точках измерения составляло 2 часа 30 минут. Измерения магнитной индукции проводились в дневное время суток. Координаты точек измерения фиксировались с помощью GPS-приемника GarminGPS 60. При построении магнитограмм средние значения амплитуд геомагнитного шума в каждой точке измерения вычислялись от пика до пика. Средние значения модуля магнитной индукции $|\mathbf{B}|$ каждой точки измерения определялись по средним значениям амплитуд компонент магнитной индукции B_x , B_y , B_z :

$$|\mathbf{B}| = \sqrt{\overline{B_x^2} + \overline{B_y^2} + \overline{B_z^2}}.$$

Выделение сигнала заданной частоты в полосе пропускания 1 Гц из цифровой записи амплитуды компонент геомагнитного поля осуществлялось с помощью цифрового фильтра, построенного на основе быстрого преобразования Фурье.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В период 2017–2018 гг. в Артинском районе Свердловской области (рис. 1) были проведены 10 синхронных измерений геомагнитного поля при относительно спокойной геомагнитной активности аппаратурой, имеющей разную полосу пропускания. На (рис. 2, 3) представлены фрагменты записей компонент магнитной индукции, типичные для данного района местности.

Анализ показывает, что записи магнитограмм вариаций геомагнитного поля имеют равномерный ход по всем составляющим магнитной индукции (рис. 2). При этом средняя амплитуда вариаций геомагнитного поля составила $B_x = 800$ пТл, $B_y = 600$ пТл, $B_z = 400$ пТл, $|\mathbf{B}| = 1077$ пТл. На спектрограммах (рис. 2) четко отобразились спектральные линии с частотами 50 Гц и амплитудой $B_x = 0.3$ пТл, $B_z = 0.24$ пТл, вызванные, очевидно, магнитным полем линий электропередач промышленной частоты, питающие населенные пункты Березовка, Рябиновка, Тюльгаш и находящиеся на расстоянии ~5 км от точки измерения (рис. 1). Отметим, что спектр амплитуды магнитной индукции, соответствующий компоненте геомагнитного поля B_y аналогичный спектру компоненты геомагнитного поля B_x (рис. 2). Поскольку источник промышленной частоты 50 Гц оказался далек, на спектрограммах частота 50 Гц проявилась в виде слабого единичного пика и согласно работе (Тягунов, Сокол-Кутыловский, 2017) совсем не проявилась в виде гармоник частоты 50 Гц во всем широком диапазоне частот.

Записи магнитограмм вариаций геомагнитного поля имеют равномерный ход по составляющим магнитной индукции B_x и B_z (рис. 3). Средняя амплитуда по этим компонентам составила $B_x = 170$ пТл и $B_z = 160$ пТл соответственно, $|\mathbf{B}| = 307$ пТл. По составляющей магнитной индукции B_y , средняя амплитуда вариаций геомагнитного поля которой составила 200 пТл,

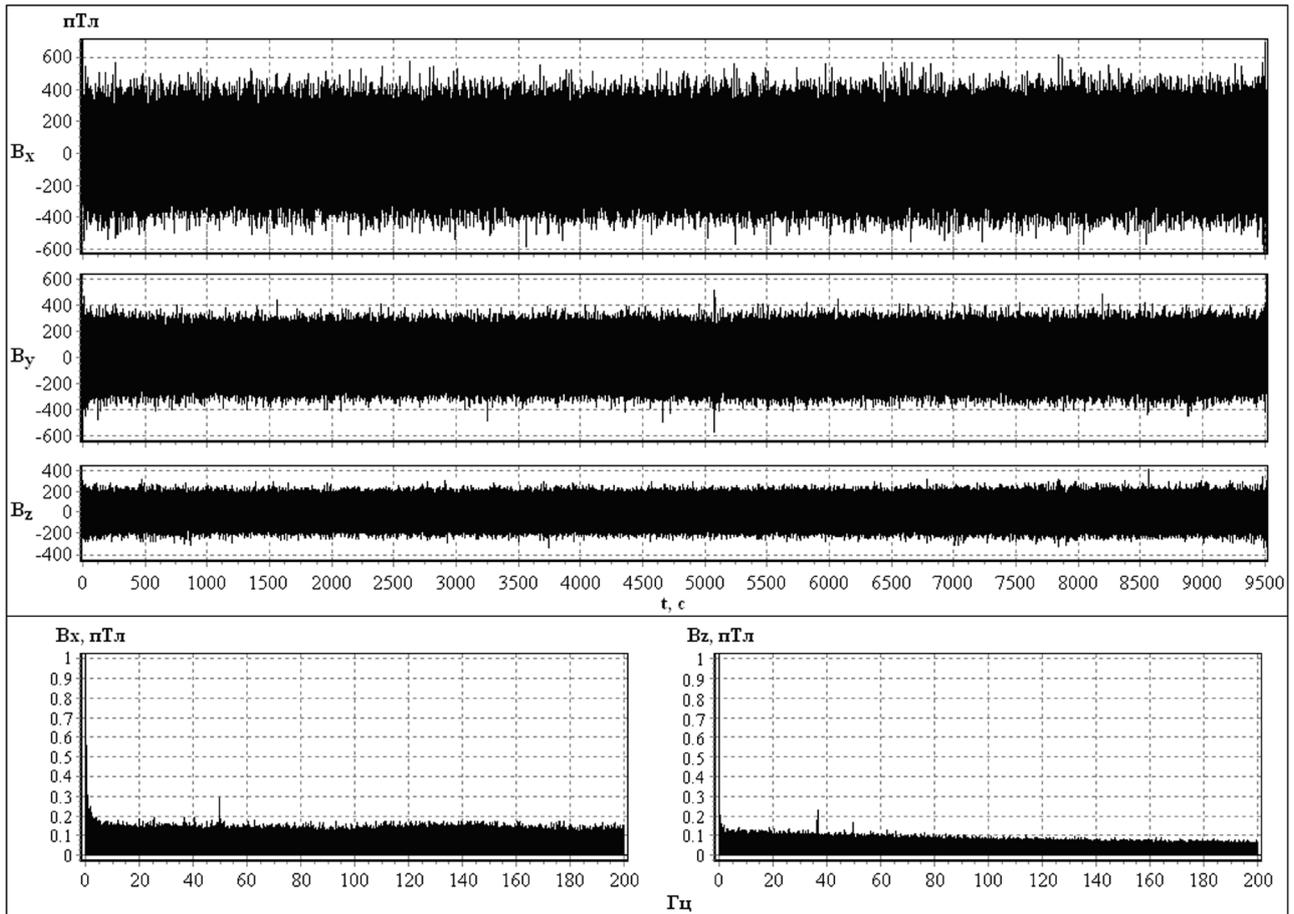


Рис. 2. Фрагменты магнитограмм компонент B_x , B_y , B_z геомагнитного поля и усредненные по времени записи спектры амплитуды магнитной индукции, соответствующие компонентам геомагнитного поля B_x и B_z в частотном диапазоне 0.01–200 Гц.

Fig. 2. Parts of magnetograms with the components B_x , B_y , B_z of the geomagnetic field and time-averaged recording spectra of the magnetic induction amplitude corresponding to the components of the geomagnetic field B_x and B_z in the frequency range 0.01–200 Hz.

наблюдаются всплески амплитуды на временных интервалах 2300–2500, 3400–4600, 8200–10000 секунд. Сравнивая спектры амплитуды магнитной индукции компонент геомагнитного поля B_y и B_z (рис. 3) можно заключить, что всплески амплитуды на магнитограмме компоненты B_y вызваны вследствие прерывистой работы низкочастотного источника, расположенного в радиусе ~ 5 км, который создал влияние (помеху) на низкочастотную область (до 10 Гц) составляющей магнитной индукции B_y при регистрации сигнала. Наглядно это показано на (рис. 4), на котором представлены записи компоненты B_y (рис. 3).

На (рис. 4) показано, что единичные всплески амплитуды, значительно превышающие среднюю амплитуду геомагнитного шума, проявляются именно на низких частотах.

На частоте 1 Гц всплески амплитуды проявились практически во всем диапазоне частоты. На частотах 3 Гц и 5 Гц проявление всплесков резко сокращается, а на частоте 10 Гц они становятся,

практически не заметны. С увеличением частоты 10 Гц всплески амплитуды на записи магнитограмм геомагнитного поля, составляющей B_y , отсутствуют полностью.

На (рис. 5, 6) показаны записи горизонтальной B_x и вертикальной B_z компонент (рис. 3) при аналогичной частотной обработке.

Сравнивая приведенные на (рис. 4, 5, 6) записи магнитограмм, можно сказать, что корреляционной зависимости между компонентами магнитной индукции не наблюдается и поэтому всплески амплитуды на составляющей B_y (рис. 4) не могут быть связаны с резонансами глобального геомагнитного поля, а носят исключительно случайный техногенный характер.

Также следует отметить, что подобные всплески амплитуды на записи горизонтальной составляющей геомагнитного шума (рис. 2) на различных частотах в полосе пропускания 1 Гц, вызванные техногенным низкочастотным источником, явно не проявились (рис. 7). Это можно объяснить тем, что общая амплитуда магнитного

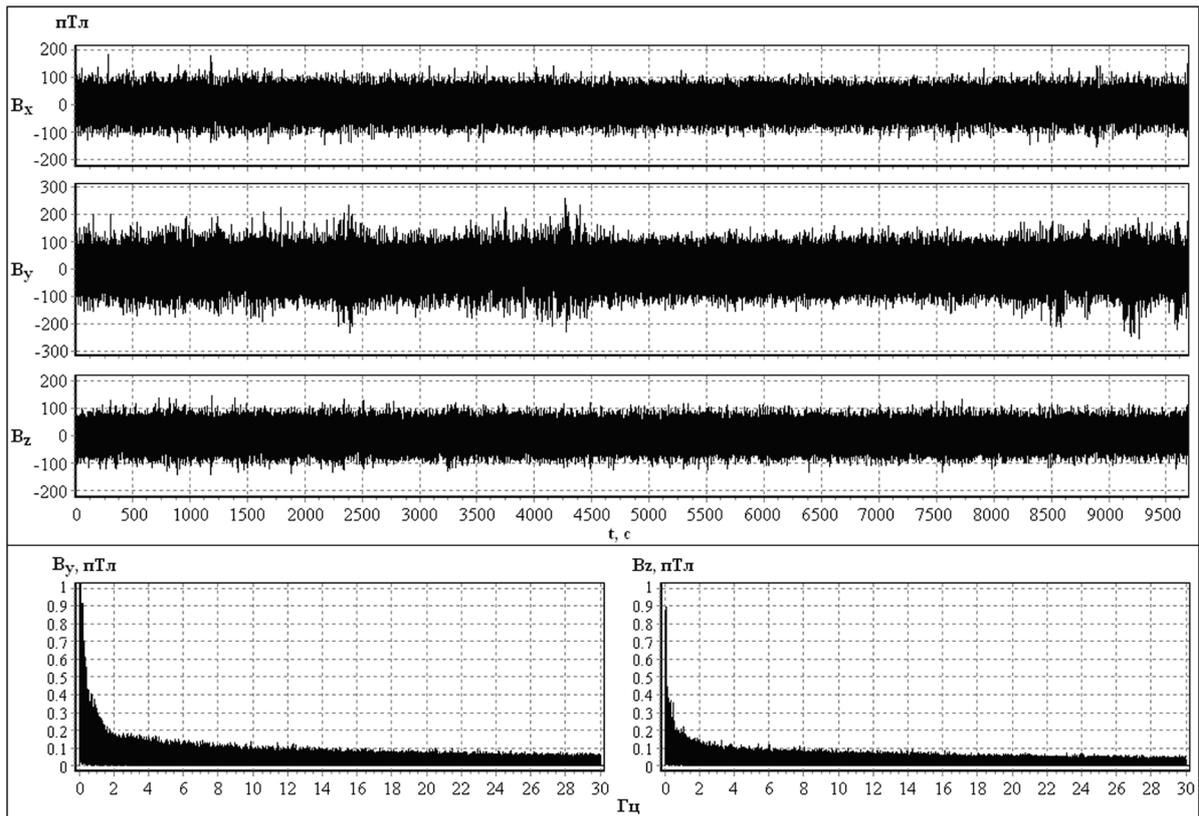


Рис. 3. Фрагменты магнитограмм компонент B_x , B_y , B_z геомагнитного поля и усредненные по времени записи спектры амплитуды магнитной индукции, соответствующие компонентам геомагнитного поля B_y и B_z в частотном диапазоне 0.01–30 Гц.

Fig. 3. Parts of magnetograms with the components B_x , B_y , B_z of the geomagnetic field and time-averaged recording spectra of the magnetic induction amplitude corresponding to the components of the geomagnetic fields B_y and B_z in the frequency range of 0.01–30 Hz.

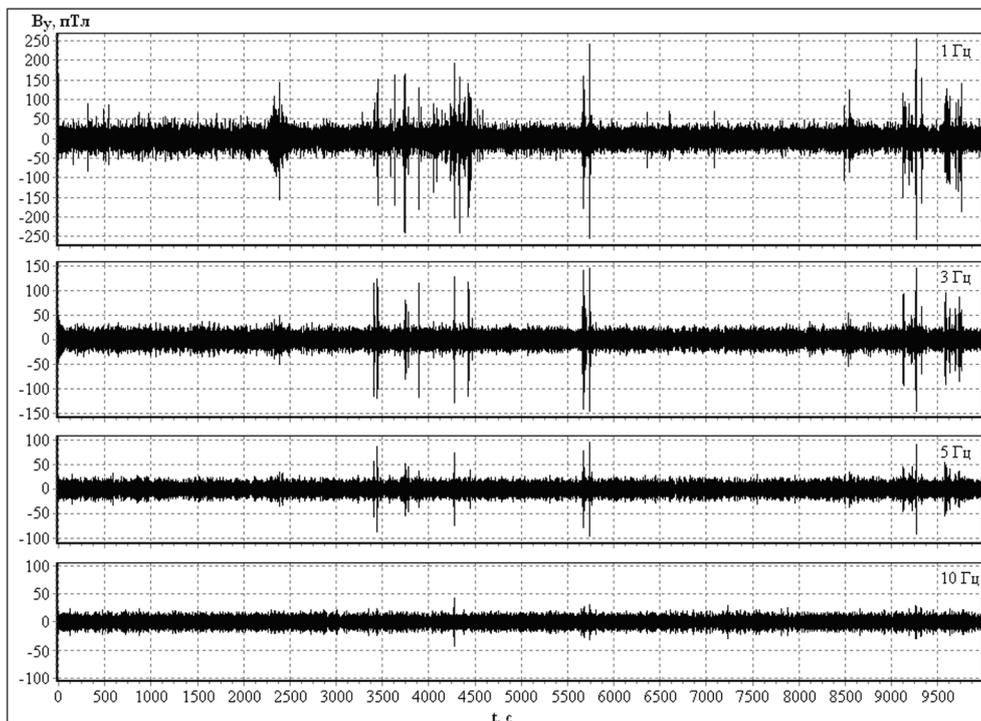


Рис. 4. Фрагменты магнитограммы компоненты B_y геомагнитного шума на различных частотах при полосе пропускания 1 Гц.

Fig. 4. Parts of the magnetogram component B_y of geomagnetic noise with different frequencies at a bandwidth of 1 Hz.

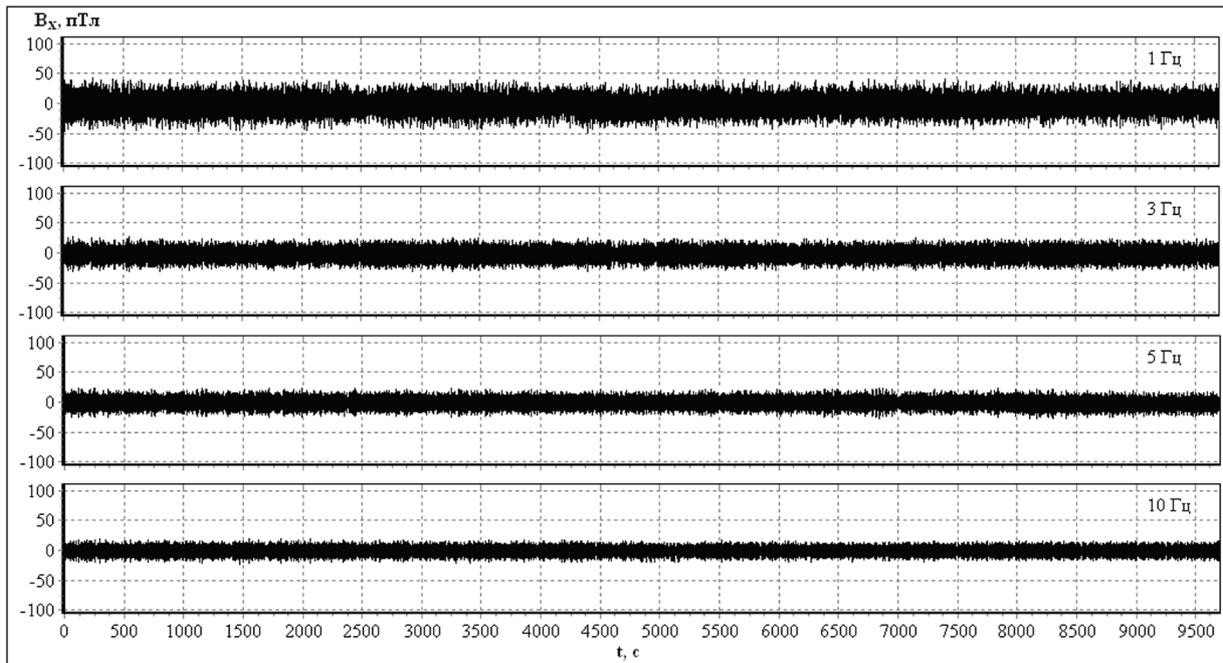


Рис. 5. Фрагменты магнитограммы компоненты V_x геомагнитного шума на различных частотах при полосе пропускания 1 Гц.

Fig. 5. Parts of the magnetogram component V_x of geomagnetic noise with different frequencies at a bandwidth of 1 Hz.

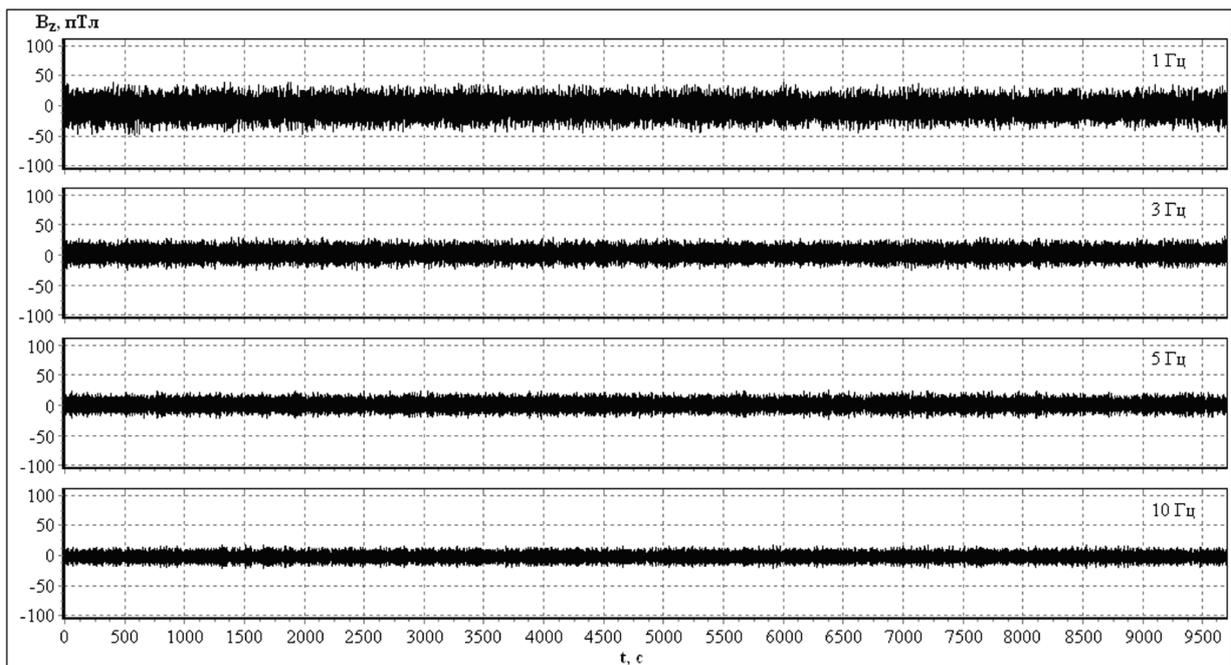


Рис. 6. Фрагменты магнитограммы компоненты V_z геомагнитного шума на различных частотах при полосе пропускания 1 Гц.

Fig. 6. Parts of the magnetogram component V_z of geomagnetic noise with different frequencies at a bandwidth of 1 Hz.

шума горизонтальной составляющей V_y (также как горизонтальной V_x и вертикальной V_z) из-за расширенного диапазона частот аппаратуры оказалась ~ 1.5 – 2 раза больше амплитуды магнитного шума самого источника (рис. 2). Поэтому магнитометр, частотный диапазон которого 0.01–200 Гц, в точке измерения не разрешил импульсный сигнал, создаваемый техногенным источником, из этого общего шума.

Из усредненных по времени спектров записей, показанных на (рис. 2, 3) следует, что аппаратура, используемая магнитомодуляционный преобразователь с автопараметрическим усилением сигнала способна фиксировать вариации геомагнитного поля, не превышающие уровень геомагнитного шума 0.2 пТл на частоте 2 Гц и 1 пТл на более низких частотах. Средняя амплитуда вариаций геомагнитного поля составляю-

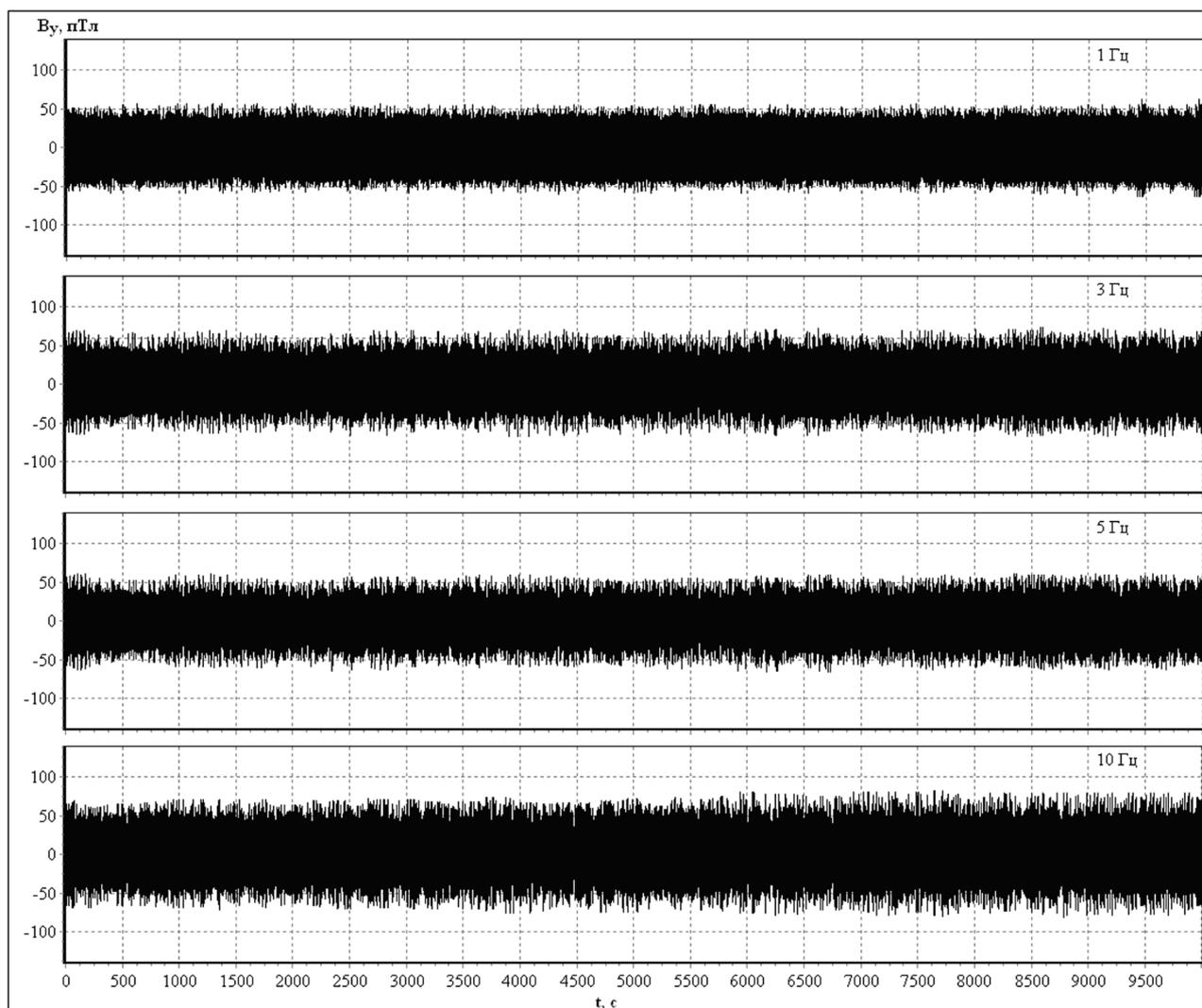


Рис. 7. Фрагменты магнитограммы компоненты B_y геомагнитного шума на различных частотах при полосе пропускания 1 Гц.

Fig. 7. Parts of the magnetogram component B_y of geomagnetic noise with different frequencies at a bandwidth of 1 Hz.

щих магнитной индукции (рис. 2) во всей полосе пропускания в два раза превышает среднюю амплитуду составляющих магнитной индукции (рис. 3), однако спектральный состав (рис. 2, 3) имеет близкие значения. Следует отметить, что указанные уровни амплитуды характеризуют геомагнитный шум, усредненный по времени записи, а не возможности аппаратуры. При более продолжительном времени записи амплитуда геомагнитного шума имеет тенденцию к дальнейшему снижению.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований установлено, что чувствительность и разрешающая способность применяемой в данной работе аппаратуры достаточна для исследования вариаций геомагнитного поля на низких частотах и вполне позволяет выполнять измерения, произ-

водимые индукционными датчиками магнитной индукции.

Показано, что аппаратура, используемая магнитомодуляционные датчики магнитной индукции способна фиксировать вариации геомагнитного поля, не превышающие уровень геомагнитного шума 0.2 пТл на частоте 2 Гц, 1 пТл и менее на более низких частотах.

Применение магнитомодуляционных датчиков магнитного поля, использующие другие физические основы первичного преобразования поля, позволяют решить проблемы массогабаритных характеристик, а также транспортировки и подготовительных работ по установке их на месте съемки, которые присущи индукционным датчикам.

Дальнейшее применение аппаратуры, использующей магнитомодуляционные преобразователи с автопараметрическим усилением сигнала возможно при измерениях компонент

магнитного поля с контролируемым или естественными источниками (Тягунов, 2017; Тягунов, 2018), при поиске и разведке рудных и нерудных полезных ископаемых (Сарвартинов и др., 2016), при мониторинге регулярного электромагнитного шумового фона в цифровом виде, при решении геолого-геофизических задач методом магнитотеллурического зондирования и многое другое. Также, при проведении геологоразведочных работ применение магнитомодуляционных датчиков позволит оперативно получить данные для картирования и профилирования, проведения крупномасштабной сети измерений исследуемой территории.

Список литературы [References]

- Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Щелкин А.П.* Магнитометрические преобразователи, приборы, установки. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1972. — 272 с. [*Afanasyev Yu.V., Studentsov N.In. Shchelkin A.P.* Magnetometric converters, devices, installations. L.: Energy. Leningrad branch, 1972. 272 p. (in Russian)].
- Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Хорев В.Н. и др.* Средства измерений параметров магнитного поля. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. 320 с. [*Afanasyev Yu.V., Studentsov N.In., Horev V.N. et al.* Means of measurement of magnetic field parameters. L.: Energy. Leningrad branch, 1979. 320 p. (in Russian)].
- Поляков С.В., Резников Б.И., Щенников А.В. и др.* Линейка индукционных датчиков магнитного поля для геофизических исследований // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 1. С. 5–27 [*Poliakov S.V., Reznikov B.I., Shchennikov A.V. et al.* The range of induction-coil magnetic field sensors for geophysical explorations // Seismic Instruments. 2016. V. 52. Iss. 1. P. 5–27. <https://doi.org/10.3103/S0747923917010078>].
- Сокол-Кутыловский О.Л., Тягунов Д.С.* Аппаратура для регистрации магнитного поля низких частот // Уральский геофизический вестник. 2007. № 4 (13). С. 69–73 [*Sokol-Kutylovskii O.L., Tyagunov D.S.* Apparatus for registering magnetic fields at low frequencies // Ural geophysical journal. 2007. № 4. V. 13. P. 69–73 (in Russian)].
- Сокол-Кутыловский О.Л.* О пороге чувствительности магнитомодуляционных датчиков // Уральский геофизический вестник. 2010. № 2 (17). С. 62–65 [*Sokol-Kutylovskii O.L.* On the threshold sensitivity magnetic modulation sensors // Ural geophysical journal. 2010. № 2. V. 17. P. 62–65 (in Russian)].
- Сарвартинов А.И., Сокол-Кутыловский О.Л., Тягунов Д.С.* Модернизация метода поиска электромагнитных аномалий по фазовому параметру // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 4ю Вып. 32. С. 124–128 [*Sarvartinov A.I., Sokol-Kutylovskii O.L., Tyagunov D.S.* Modernization of the method of the search for electromagnetic anomalies on the phase parameter // Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle. 2016. № 4(32). P. 124–128 (in Russian)].
- Тягунов Д.С., Сокол-Кутыловский О.Л.* Спектр магнитного шума низких частот в крупном городе // Геоэкология. 2017. № 2. С. 38–46. <https://doi.org/10.1134/S0869780318050083>. [*Tyagunov D.S.* Low frequency magnetic noise spectrum in a large city // Geoecology. 2017. № 2. P. 38–46 (in Russian)].
- Тягунов Д.С.* Распределение техногенного магнитного шума низких частот по площади крупного промышленного города // Геофизические процессы и биосфера. 2017. Т. 16. № 4. С. 21–27. <https://doi.org/10.21455/GPB2017.4-2> [*Tyagunov D.S.* Distribution of Manmade Low-Frequency Magnetic Noise in a Big Industrial City // Izvestiya atmospheric and oceanic physics. 2017. V. 54. Iss. 7. P. 700–704. <https://doi.org/10.1134/S0001433818070162>].
- Тягунов Д.С.* Распределение городского техногенного магнитного шума в зависимости от расстояния (на примере Екатеринбурга) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 1. Вып. 37. С. 84–91 [*Tyagunov D.S.* Distribution of urban man-made magnetic noise depending on the distance (on the example of Ekaterinburg) // Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle. 2018. № 1(37). P. 84–91 (in Russian)].
- Metronix. [Электронный ресурс], дата обращения 04.07.2019. Режим доступа: <http://www.geo-metronix.de/mtxgeo/index.php/sensors-main> [Metronix. [electronic resource], date of treatment 04.07.2019. <http://www.geo-metronix.de/mtxgeo/index.php/sensors-main>].
- Phoenix. [Электронный ресурс], дата обращения 04.07.2019. — Режим доступа: <http://www.phoenix-geophysics.com/products/sensors/> [Phoenix. [electronic resource], date of treatment 04.07.2019. <http://www.phoenix-geophysics.com/products/sensors/>].

ТЯГУНОВ

**MEASUREMENTS OF GEOMAGNETIC FIELD VARIATIONS
IN THE LOW FREQUENCY RANGE**

D.S. Tyagunov

*Institute of Geophysics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russia, 620016*

The article presents the results of measurements of geomagnetic field variations obtained using magnetometers with different frequency range (0.01–200 Hz and 0.01–30 Hz) developed at the Institute of Geophysics of Uro RAS. The measurements showed that the sensitivity and resolution of the equipment used in the work is sufficient to study the variations of the geomagnetic field at low frequencies. It is shown that magnetometers used by magnetic modulation converter with auto-parametric amplification of the signal are capable of recording variations of the geomagnetic field that do not exceed the level of geomagnetic noise of 0.2 pT at a frequency of 2 Hz and 1 pT at lower frequencies. The average amplitude of the variations in the geomagnetic field of the magnetic induction components recorded by the device with a frequency range of 0.01–200 Hz in the entire bandwidth is twofold higher than the average amplitude of the magnetic induction components recorded by the device with a frequency range of 0.01–30 Hz, but the spectral composition shows close values.

Keywords: the geomagnetic noise, magnetic induction, magnetic field.