

ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЙ ПРИЕМНИК СИГНАЛОВ ОЧЕНЬ НИЗКОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА С ПРЕЦИЗИОННОЙ ПРИВЯЗКОЙ ДАННЫХ К МИРОВОМУ ВРЕМЕНИ

© 2021 г. С. В. Пильгаев^{а,*}, А. В. Ларченко^а, Ю. В. Федоренко^а,
М. В. Филатов^а, А. С. Никитенко^а

^а Полярный геофизический институт

Россия, 184209, Апатиты Мурманской обл., ул. Академгородок, 26а

*e-mail: pilgaev@pgia.ru

Поступила в редакцию 02.03.2021 г.

После доработки 16.03.2021 г.

Принята к публикации 18.03.2021 г.

Описан разработанный трехкомпонентный приемник сигналов очень низкого частотного диапазона, позволяющий регистрировать две горизонтальные магнитные и вертикальную электрическую компоненты электромагнитного поля в диапазоне частот от 300 Гц до 15 кГц. Особенности приемника являются применение гальванического разделения цифровой и аналоговой частей регистратора и прецизионная привязка данных к мировому времени с ошибкой не более 1 мкс.

DOI: 10.31857/S0032816221040248

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Низкочастотные электромагнитные излучения являются одним из основных инструментов исследования околоземной плазмы и изучения процессов, происходящих в ней. В последнее время для исследований низкочастотных излучений все чаще используются данные спутниковых наблюдений. Однако в развитии современных представлений о геофизических явлениях немалую роль играет и исследование поля низкочастотных электромагнитных волн, регистрируемых у земной поверхности.

Основной упор в данных исследованиях делается на изучение естественных излучений: сигналов грозových разрядов и эмиссий, возникающих в результате их взаимодействия с энергичными частицами магнитосферной плазмы, эмиссий магнитосферного происхождения, таких как хоры, шипения и квазипериодические излучения. Часто в экспериментах по зондированию магнитосферы, ионосферы и литосферы используются низкочастотные сигналы искусственного происхождения, генерируемые наземными и спутниковыми источниками. Базовыми задачами являются исследования механизмов генерации низкочастотных эмиссий и определения характеристик среды их распространения.

Наземные наблюдения электромагнитных полей в очень низкочастотном (о.н.ч.) диапазоне стали широко проводиться во второй половине

20-го века. Первые теоретические расчеты распространения о.н.ч.-излучений в волноводе Земля–ионосфера показали, что если представить поверхность Земли как высокопроводящую однородную плоскость, то амплитуды горизонтальных компонент напряженности магнитного поля (H_x , H_y) и вертикальной компоненты напряженности электрического поля (E_z) у земной поверхности, как минимум, на порядок превышают амплитуды компонент E_x , E_y и H_z [1, 2]. Поэтому в большинстве случаев практическую значимость имеет только регистрация компонент H_x , H_y и E_z . Результаты регистрации этих трех компонент могут быть использованы, например, для исследования положения источника регистрируемых о.н.ч.-излучений или исследования реакции нижней ионосферы на гелиогеофизические воздействия [3, 4].

Обзор существующих приемников. Для исследования пространственно-временных характеристик искусственных и естественных низкочастотных излучений и их источников используются пространственно распределенные сети наземных о.н.ч.-приемников. Основным требованием к оборудованию таких сетей является точная привязка данных ко времени. Непревзойденными источниками точного времени в настоящее время являются GPS/ГЛОНАСС-приемники ввиду их легкодоступности, высокой временной точности и возможности использования их в условиях изоляции от интернета и других наземных средств

передачи сигналов точного времени. Как следствие, практически все системы сбора данных сетей о.н.ч.-станций для синхронизации времени используют GPS/ГЛОНАСС-приемники.

Проведенный анализ существующих систем сбора данных показал, что их можно поделить по типу привязки данных к Мировому Времени на два вида. Первый вид основан на использовании параллельных аналого-цифровых преобразователей (а.ц.п.) с дополнительным аналоговым каналом. Дополнительный канал используется для входа Pulse-Per-Second (PPS) импульса от GPS/ГЛОНАСС-приемника. Время прохождения сигнала через каждый аналого-цифровой тракт параллельных преобразователей идентично. Отсчет данных, содержащий фронт PPS-импульса, будет соответствовать началу секунды. Соответствующий отсчет данных сигнала о.н.ч.-антенны будет привязан к началу секунды. Время каждого отдельного отсчета данных между PPS-импульсами рассчитывается интерполяцией в соответствии с числом отсчетов между временными метками. Примером такой системы является сеть WWLLN (World-Wide Lightning Location Network), предназначенная для определения местонахождения источника молниевых разрядов [5, 6]. В данной системе в качестве аналого-цифрового преобразователя чаще всего используется компьютерная аудиокарта. Подобную схему измерений использует и система AARDDVARK [7], использующая данные регистрации амплитуд и фаз сигналов передатчиков радионавигационных систем связи для исследования нижней ионосферы.

Второй вид — системы сбора данных, где GPS/ГЛОНАСС-приемник используется в системе фазовой автоподстройки частоты (ф.а.п.ч.) опорного тактового сигнала. Аналого-цифровые преобразователи системы сбора тактируются управляемым генератором. Выходная частота генератора зависит от подаваемого на него напряжения. Источником управляющего напряжения является цифроаналоговый преобразователь (ц.а.п.) с контроллером. Контроллер в схеме ф.а.п.ч. подсчитывает число тактов между двумя последовательными PPS-импульсами GPS/ГЛОНАСС-приемника и корректирует напряжение на выходе ц.а.п. Одной из самых распространенных систем такого типа является приемник AWESOME стэнфордского университета [8]. Такой подход позволяет фиксировать частоту дискретизации аналого-цифрового преобразователя, что упрощает обработку данных измерений. Обычно заявляемая производителем таких систем точность привязки данных ко времени совпадает со среднеквадратичным отклонением PPS-импульса GPS/ГЛОНАСС-приемника. Аналогичный подход используется и в приемнике уханьского университета [9]. Однако информация об используемом методе

привязки отсчетов данных к фронту PPS-импульса в описаниях данных приемников отсутствует.

Особенности эксплуатации. В о.н.ч.-диапазоне, как и в крайне низком (к.н.ч.) и сверхнизком (с.н.ч.) частотных диапазонах [10], при регистрации компонент электромагнитного поля доминирующим источником помех, как правило, является поле с промышленными частотами 50 или 60 Гц от местных линий электропередач и электроприборов. Частоты гармоник этого поля могут достигать нескольких килогерц, а их амплитуда на порядок превышать регистрируемые о.н.ч.-сигналы. В некоторых случаях помехи, наведенные линиями передач, могут быть отслежены и подавлены (вычтены) при пост-обработке данных регистратора, но это возможно только при условии, что уровень мощности помех не приведет к перегрузке каскадов усилительного тракта. Поэтому для снижения воздействия сетевой помехи на результаты регистрации электромагнитного поля необходимо размещение антенной системы на большом расстоянии от мощных потребителей электроэнергии. Тогда потенциал заземления электрической антенны в месте ее установки будет отличаться от потенциала заземления обсерватории из-за неоднородности токов, растекающихся от заземлений мощных потребителей. Соединение заземления антенны с “землей” обсерватории приводит к возникновению в электрической компоненте мощной помехи частотой 50 Гц и перегрузке усилительных каскадов. Поэтому для измерений компоненты E_z в условиях обсерваторий необходимо гальваническое разделение заземлений электрической антенны и цифровой части регистратора. Зачастую, гальваническое разделение выполняется при помощи одного или нескольких трансформаторов на аналоговой линии электрической антенны [11]. Однако использование трансформаторов нетехнологично в силу нелинейности изменения их характеристик при колебаниях температуры и, соответственно, сложности учета влияния этих изменений на результаты регистрации. Проблема особенно актуальна в высокоширотных регионах, где годовые изменения температуры достигают наибольших значений, поэтому в нашем случае необходимо использовать другие варианты исполнения гальванического разделения.

Задача регистрации сигналов о.н.ч.-диапазона естественного происхождения, таких как атмосферика, хоры, магнитосферные и авроральные шипения, квазипериодические эмиссии и т.д., в силу широкого динамического диапазона этих явлений, предъявляет соответствующие требования к динамическому диапазону блока а.ц.п. Наибольшей интенсивностью обладают сигналы атмосфериков, в то время как интенсивность эмиссии магнитосферного происхождения зачастую незначительно превышает фоновый шум волновода Земля—ионосфера. Поэтому динами-

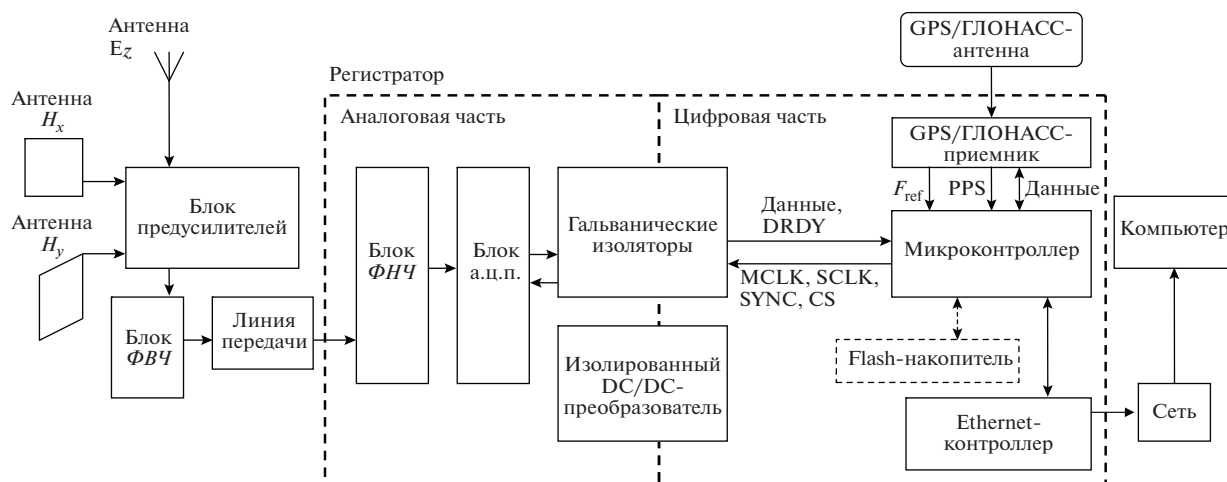


Рис. 1. Блок-схема о.н.ч.-приемника.

ческий диапазон а.ц.п. должен быть достаточно широким.

Для упрощения обработки данных измерений частота дискретизации блока а.ц.п. должна быть фиксированной. Поэтому в качестве источника опорной частоты микросхем а.ц.п. должен использоваться стабилизированный термокомпенсированный кварцевый генератор с низким фазовым шумом, связанный с GPS/ГЛОНАСС-приемником для поддержания фиксированной тактовой частоты.

Для решения ряда задач, связанных с регистрацией о.н.ч.-сигналов как естественного, так и искусственного происхождения, возникла необходимость разработки о.н.ч.-приемника, адаптированного к условиям эксплуатации на сети высокоширотных станций Полярного геофизического института (ПГИ). В 2012 году в ПГИ был разработан и введен в эксплуатацию трехкомпонентный о.н.ч.-приемник, обладающий прецизионной привязкой данных к мировому времени. Одним из элементов системы является разработанный в ПГИ аналого-цифровой преобразователь [12]. В ходе эксплуатации а.ц.п. был доработан. С целью обеспечения мобильности системы для работы в полевых условиях реализована запись на энергонезависимую FLASH-память. Для этого в а.ц.п. был установлен более производительный микроконтроллер с интерфейсом SDIO для записи в память MicroSD. Для устранения дрейфа частоты дискретизации а.ц.п. из схемы исключен кварцевый резонатор. В качестве опорного тактового сигнала используется стабилизированный по времени сигнал с выхода GPS/GLONASS-приемника. В статье приведена последняя версия приемника, эксплуатирующаяся в настоящее время.

ОПИСАНИЕ О.Н.Ч.-ПРИЕМНИКА

Блок-схема

На рис. 1 приведена упрощенная блок-схема разработанного в ПГИ о.н.ч.-приемника.

Разработанный приемник представляет собой программно-аппаратный комплекс, состоящий из компьютера, антенной системы, блока предусилителей и регистратора. Последний включает в себя: блоки фильтров низкой частоты (ФНЧ) и а.ц.п., микроконтроллерную плату, GPS/ГЛОНАСС-приемник, преобразователи напряжения, гальванические изоляторы и интерфейс ввода/вывода. Для регистрации компонент электромагнитного поля используется система активных антенн, позволяющая регистрировать две горизонтальные магнитные и вертикальную электрическую компоненты. Сигнал с выхода предусилителей поступает на вход блока фильтров высоких частот (ФВЧ) для ослабления основной гармоники питающей сети 50 Гц и передается через линию длиной в несколько сотен метров на вход блока ФНЧ, который необходим для подавления частот выше половины частоты дискретизации. Блок а.ц.п. осуществляет аналого-цифровое преобразование. Привязка отсчетов данных к мировому времени осуществляется микроконтроллером.

Элементная база приемника подобрана с учетом работы в промышленном диапазоне температур от -40 до $+85^{\circ}\text{C}$. Создано и отработано несколько вариантов конфигурации регистратора. Запись данных может производиться как на встроенную FLASH-память так и на компьютер через интерфейс Ethernet. В свою очередь, благодаря универсальности сетей Ethernet регистратор может осуществлять передачу данных через коммутатор, маршрутизатор или сеть Wi-Fi.

Так как техническое исполнение регистраторов зависит от условий эксплуатации здесь, для

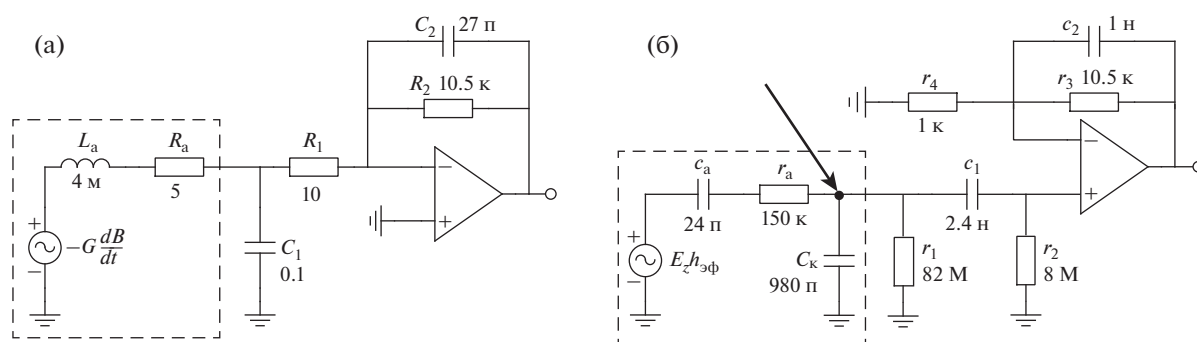


Рис. 2. Эквивалентные схемы антенн с входными усилительными каскадами: **а** — магнитной рамочной антенны; **б** — вертикальной электрической антенны. Стрелкой показано место подачи калибровочного сигнала (см. в разделе “Характеристики измерительных каналов”).

примера, рассмотрим устройство стационарного о.н.ч.-приемника, установленного в обсерватории “Ловозеро” и предназначенного для проведения непрерывных стационарных наблюдений. Опытная эксплуатация прибора проводилась с 2012 по 2013 г. Начиная с 2013 г. и по настоящее время его эксплуатация проводится в режиме непрерывной регистрации.

Аналоговая часть

Аналоговая часть приемника включает в себя антенную систему, состоящую из двух ортогонально расположенных магнитных рамочных антенн и вертикальной электрической антенны, блоков фильтров *ФНЧ* и *ФВЧ*, блока предусилителей и линии передачи сигнала.

Для регистрации магнитных компонент поля в о.н.ч.-диапазоне используются магнитные рамочные антенны. Антенны данного типа представляют собой катушку индуктивности с воздушным сердечником, имеющую достаточно большие геометрические размеры (площадь сечения до десятков м²) и небольшое число витков (до нескольких десятков). Измерение вертикальной электрической компоненты проводится с помощью вертикального диполя, который, как правило, выполнен в виде металлического штыря или сосредоточенной емкости, например шара или цилиндра, расположенного на высоте в несколько метров над поверхностью земли. Вопрос проектирования такого рода антенн в литературе обсуждался неоднократно, например в работах [8, 13]. Поэтому в данной работе мы ограничимся только описанием конкретной реализации антенн, используемых в разработанном приемнике.

Горизонтальные магнитные рамочные антенны.

Горизонтальные магнитные рамочные антенны выполнены из медного 28-жильного экранированного кабеля. Площадь сечения жил кабеля 1.5 мм². Концы жил отрезка кабеля соединены последователь-

но, образуя рамочную антенну из 28 витков, причем от 14-го витка сделан отвод, соединенный с аналоговой землей. Экран кабеля имеет разрыв. Каждая из рамок имеет форму прямоугольника с геометрическими размерами 2.5 × 2.2 м. Расположены рамки в здании магнитного павильона ортогонально к поверхности земли и друг относительно друга. Таким образом, каждая антенна имеет две катушки по 14 витков, с активным сопротивлением $R_a \approx 5$ Ом и индуктивностью $L_a \approx 4$ мГн (рис. 2а).

Вертикальная электрическая антенна. Вертикальная электрическая антенна представляет собой скругленный полый цилиндр Ø35 см и высотой 40 см, выполненный из дюралюминия. Цилиндр закреплен на мачте высотой 11 м. С учетом того, что глубина промерзания почвы в месте установки антенны составляет порядка 2 м, заземление антенны выполнено из 6 металлических штырей длиной 2.5 м, утопленных в грунт в радиусе 1 м вокруг мачты и соединенных между собой металлической лентой. Для формирования “искусственной земли” в месте установки антенны развернута система противовесов, представляющая собой набор проводов длиной примерно в 3 раза больше высоты антенны, растянутых радиально от ее мачты. Такая “искусственная земля” значительно ослабляет влияние мелких неровностей земной поверхности и возможных локальных неоднородностей проводимости на результаты измерений. Для подавления сигналов радиостанций последовательно с выходом емкости антенны включен резистор $r_a = 150$ кОм (рис. 2б), образующий с емкостью соединительного кабеля (C_k) *ФНЧ*. Для обеспечения согласования импедансов антенн и входных усилительных каскадов, а также для обеспечения низкого уровня шума и малого уровня резистивных потерь на длине кабеля, соединяющего антенну с входом усилителей, блок предусилителей расположен рядом с антенной системой. Передача сигнала с выхода

антенны E_z к входу предусилителя выполнена посредством коаксиального кабеля РК-50 длиной 11 м, емкость кабеля C_k при этом составляет 980 пФ. Расчетная емкость самой антенны составляет ~24 пФ.

Входные каскады, линия, блоки фильтров. Эквивалентные схемы пассивных частей антенн приведены на рис. 2 и выделены штриховыми линиями. Одно плечо рамочной антенны на эквивалентной схеме представлено собственной индуктивностью L_a , сопротивлением R_a и коэффициентом преобразования G производной по времени от индукции измеряемого магнитного поля B в напряжение. Вертикальная электрическая антенна представлена собственной емкостью c_a , сопротивлением r_a , емкостью кабеля C_k и коэффициентом эффективной высоты антенны $h_{эф}$, связывающим напряженность измеряемого электрического поля E_z с напряжением на выходе антенны.

Схемы входных каскадов антенн приведены на рис. 2. Во входном каскаде предусилителя магнитной антенны (рис. 2а) использован малошумящий операционный усилитель фирмы Analog Devices AD797, включенный по схеме инвертирующего усилителя. Емкость C_1 обеспечивает спад характеристики на частотах выше 150 кГц для подавления высокочастотных сигналов радиостанций и предотвращает их детектирование на входных цепях, а также минимизирует уровень собственных шумов в середине рабочего диапазона приемника. Резистор R_1 определяет коэффициент усиления по постоянному току. Конденсатор C_2 препятствует возбуждению усилителя.

В предусилителе E_z (рис. 2б) использован операционный усилитель ADA4627, включенный по неинвертирующей схеме. Резистор r_a с емкостью кабеля C_k образуют фильтр низких частот и обеспечивают спад характеристики на частотах 70 кГц и выше. Резистор r_2 ограничивает частотный диапазон снизу. Параллельное соединение c_2 и r_3 в цепи обратной связи образуют $\Phi НЧ$ с частотой среза 15 кГц. Резистор r_1 предназначен для стока статического заряда, накапливаемого в емкости антенны при сильных метелях за счет трибоэлектрического эффекта. Разделительный конденсатор c_1 с номинальным напряжением 1600 В обеспечивает защиту входной цепи от пробоя в случае возникновения в области антенны сильных электростатических полей.

Как уже говорилось выше, при детектировании электромагнитных сигналов естественного и искусственного происхождения доминирующим источником помех, наводимых на магнитные и электрические антенны, является электромагнитное поле от местных линий электропередач. Поэтому для минимизации воздействия сетевой помехи электрическая и магнитные антенны раз-

мещены вдали на значительном расстоянии от ее источников. Для снижения уровня сетевой помехи во избежание перегрузки последующих каскадов используется блок $\Phi ВЧ$ первого порядка с частотой среза 200 Гц, выполненный на операционных усилителях ОР297. Регистратор расположен в техническом здании и соединен с блоком $\Phi ВЧ$ длинной кабельной линией. В обсерватории “Ловозеро” расстояние от антенной системы до здания обсерватории составляет около 300 м. Поэтому для повышения помехоустойчивости выходные каскады блока $\Phi ВЧ$ обеспечивают дифференциальный выход сигнала, который передается по витым парам длинной линии на вход регистратора.

Частота дискретизации блока а.ц.п. составляет 32 кГц. Для выполнения условий теоремы Котельникова и для удаления высокочастотных составляющих, наведенных на линию передачи, в регистратор интегрирован блок $\Phi НЧ$. Основой этого блока является фильтр Бесселя третьего порядка, реализованный по схеме Салена–Кея. Каскады блока $\Phi ВЧ$ выполнены на микросхемах ОР297, блок а.ц.п. — на микросхемах AD7767-2. Затухание сигнала на частотах, близких к частоте Найквиста, обеспечивается интегрированным в микросхему а.ц.п. антиалиасинговым фильтром. Таким образом, на частоте 16 кГц обеспечивается затухание порядка 30 дБ и на частоте, равной 17.5 кГц, более 118 дБ. Рабочая полоса частот блока а.ц.п. 0–15 кГц. Входящие в состав данного блока 24-битные аналого-цифровые преобразователи обеспечивают динамический диапазон до 115.5 дБ.

Для снижения уровня промышленной помехи (50 Гц) применено гальваническое разделение цепей прибора и сети питания помещения обсерватории, где расположен компьютер. Регистратор питается от общей сети 220 В через разделительный трансформатор. Компьютер и регистратор гальванически разделены посредством трансформаторов интерфейса Ethernet. Внутри регистратора аналоговая часть отделена от цифровой гальваническими изоляторами трансформаторного типа и изолированными DC/DC-преобразователями. Таким образом обеспечивается достаточное для регистрации естественных о.н.ч.-сигналов подавление помех от питающей сети обсерватории.

Цифровая часть

Цифровая часть разработанного о.н.ч.-приемника работает под управлением микроконтроллера LPC1788. Микроконтроллер непосредственно управляет GPS/ГЛОНАСС-приемником, микросхемами а.ц.п. и Ethernet-интерфейсом для связи с компьютером. Для синхронизации времени используется GPS/ГЛОНАСС-приемник lea-m8t со встроенным резонатором (Temperature Compensated).

sated Crystal Oscillators) ТСХО-типа. Он имеет стандартный выход PPS и программируемый выход сигнала тактовой частоты. Последний является источником опорной частоты для микроконтроллера. Модуль таймера микроконтроллера, используя делители, формирует меандр частотой 1024 кГц, который является номинальной опорной частотой для микросхем а.ц.п. Так достигается стабильность частоты дискретизации. Блок а.ц.п. имеет три аналоговых дифференциальных входа, диапазон входных напряжений $-2.5...+2.5$ В. Параллельная работа аналого-цифровых преобразователей от одного тактового источника обеспечивает точное временное соответствие отсчетов данных всех трех каналов.

Сформированные пакеты данных могут передаваться как через интерфейс Ethernet на компьютер, так и записываться на энергонезависимую память. Регистратор формирует из оцифрованных данных пакеты по 1024 байт с указанием необходимой информации о процессе сбора в заголовке пакета. Заголовок содержит в себе значение частоты дискретизации, временную метку, координаты станции и статус GPS/ГЛОНАСС-приемника. Координаты станции необходимы при регистрации данных на движущихся платформах, как, например, в эксперименте “Трансарктика-2019” [14]. При наличии вспомогательного GPS/ГЛОНАСС-приемника, установленного на расстоянии, можно определить азимут магнитных рамочных антенн в каждый конкретный момент времени. Для контроля целостности данных в конце пакета расположены 2 байта контрольной суммы, вычисленной по алгоритму CRC-16-CCITT. Расчет контрольной суммы производится встроенным аппаратным модулем микроконтроллера. Размер пакета кратен размеру сектора энергонезависимой памяти, поскольку именно так достигается максимальная скорость записи.

Синхронизация данных со временем осуществляется посредством вставки временной метки в пакет. Метка представляет собой совокупность мирового времени, выраженного в секундах в формате POSIX TIME, и времени в отсчетах таймера микроконтроллера. Разрешение таймера микроконтроллера совпадает с тактовой частотой ядра микроконтроллера. Источником времени для данных является PPS-импульс. По фронту сигнала PPS микроконтроллер перезапускает внутренний таймер и инкрементирует переменную времени, содержащую время в секундах. Следующему за сигналом PPS отсчету а.ц.п. присваивается временная метка. В заголовке отмечается точное время и номер отсчета с временной меткой. Для поддержания актуального времени в микроконтроллере проводится постоянное его сравнение и коррекция со временем, получаемым из данных GPS/ГЛО-

НАСС-приемника. Сверка происходит только при условии достоверности данных о времени, которые передает GPS/ГЛОНАСС-приемник. Сведения о достоверности данных содержатся в специальных пакетах GPS/ГЛОНАСС-приемника. При наличии разницы во времени, полученном от GPS/ГЛОНАСС-приемника, и времени, которое хранится в микроконтроллере, значение переменной времени внутри микроконтроллера обновляется. В результате интерполяции отсчетов времени максимальная погрешность привязки данных ко времени не превышает 1 мкс.

Стек протокола TCP/IP реализован на базе LWIP [15], предназначенного для встраиваемых систем. Для экономии ресурсов используется транспортный протокол передачи UDP. Во внешней оперативной памяти организован кольцевой буфер, способный хранить массив данных длительностью более минуты. Учитывая отсутствие гарантированности доставки UDP-пакетов, реализован механизм повторной отправки потерянных данных. Программа на компьютере контролирует порядок следования пакетов от приемника по инкрементируемой переменной в заголовке каждого пакета. По запросу с компьютера микроконтроллер дублирует утерянные в процессе передачи пакеты данных.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ

Частотные характеристики

Процесс оценки амплитудно-частотной (а.ч.х.) и фазочастотной (ф.ч.х.) характеристик измерительных каналов магнитных компонент разработанного о.н.ч.-приемника подробно приведен в [16]. На магнитные рамочные антенны устанавливается калибровочный тороид, так чтобы средняя линия тороида пересекала плоскости рамочных антенн. При помощи специализированного генератора в обмотке тороида создается ток i , соответственно, магнитный поток, пересекающий плоскости рамочных антенн [16, 17]. Зависимость создаваемого в тороиде магнитного потока (Φ) от тока в его обмотке (I) выражается следующим образом:

$$\Phi = \frac{\mu_0 N I w}{2\pi} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right),$$

где N — число витков в обмотке тороида, w — толщина тороида, r_1 и r_2 — его внутренний и внешний радиусы соответственно. Тогда эквивалентная индукция однородного магнитного поля в плоскости рамочной антенны $B_{\text{экв}}$ рассчитывается как $B_{\text{экв}} = \Phi/S_a$, где S_a — площадь рамочной антенны.

Особенностью используемого генератора является точная привязка фазы выходного сигнала к мировому времени. Напряжение с выхода генератора подается на вход калибровочного тороида через сопротивление $R = 500$ Ом, создавая тем самым ток в обмотке тороида. Амплитуда и фаза создаваемого тока и, соответственно, магнитного потока в каждый момент времени известны с высокой степенью точности. По данным оцифровки сигналов на выходах измерительных каналов производятся оценки амплитуд и фаз калибровочного сигнала. Так как фаза выходного сигнала генератора известна, провести оценки а.ч.х. и ф.ч.х. измерительных каналов с учетом всех задержек, включая задержку процесса аналого-цифрового преобразования, не составляет труда.

Провести прямую калибровку вертикальной электрической антенны невозможно в силу ее больших геометрических размеров и трудностей создания однородного калибровочного поля. Однако, как показано в [10], можно провести оценку ее передаточной характеристики с точностью до постоянного множителя. В [10] приведен вариант оценки передаточной характеристики антенны к.н.ч./с.н.ч.-диапазона с использованием вспомогательной излучающей антенны, с помощью которой на входе измерительной антенны создается калибровочное поле. Емкость между излучающей и измерительной антеннами в данном диапазоне частот оказывает незначительное влияние на фазу калибровочного сигнала, однако в о.н.ч.-диапазоне это не так. Очевидно, что для учета влияния емкости на измеряемую ф.ч.х. необходимо иметь точные ее оценки, провести которые затруднительно из-за сложности образуемой системы из приемной и передающей антенн. Поэтому в описываемой схеме калибровочный сигнал подается через емкость $C_{\text{кал}}$ непосредственно в точку соединения выхода пассивной части антенны с входом предусилителя. Точка подключения генератора показана на рис. 2б стрелкой. При выборе номинала $C_{\text{кал}}$ в пределах 10–100 пФ максимальное отклонение измеренной ф.ч.х. от действительной на частоте 14 кГц не превысит 0.3 рад.

Провести коррекцию отклонения ф.ч.х. измерительного канала E_z , вызванного влиянием емкости $C_{\text{кал}}$, возможно следующим образом. Имея оценки величин c_a и C_k и номиналы остальных элементов схемы входного каскада (рис. 2б), необходимо провести расчет его передаточной функции $W(f)$, f – частота. Затем провести расчет передаточной функции $W_{\text{кал}}(f)$ схемы с источником напряжения, подключенным через емкость $C_{\text{кал}}$ к точке, обозначенной на рис. 2б стрелкой, и рассчитать функцию коррекции $W_k = W_{\text{кал}}/W$. Тогда коррекция передаточной функции, получен-

ной в ходе калибровочных измерений $W_{\text{изм}}(f)$, выполняется как $W_{\text{кор}} = W_{\text{изм}}/W_k$.

Получение абсолютного значения величины вертикального электрического поля возможно только при известном значении постоянного масштабирующего множителя k , связывающего относительные единицы полученной в ходе калибровки а.ч.х. измерительного канала с напряженностью поля на входе антенны. Для оценки k существует несколько подходов. Наиболее простой связан с измерениями и расчетом параметров пассивных элементов электрической антенны и оценкой ее действующей высоты. Однако в таких расчетах невозможно учесть все агенты, влияющие на ее действующую высоту, например рельеф поверхности земли в месте ее установки и окружающие объекты. Другие подходы связаны с оценками параметров зарегистрированных сигналов удаленных от точки регистрации естественных или искусственных источников. Например, для этого возможно применение сигналов атмосфериков или ионосферного источника в экспериментах по нагреву ионосферы модулированным коротковолновым радиоизлучением [17, 18]. Необходимым условием является распространение регистрируемого сигнала по волноводу Земля–ионосфера на поперечной электромагнитной моде (ТЕМ), для которой $|E_z|/|H| \approx Z_0$, где $Z_0 = 120\pi$ Ом – импеданс свободного пространства, откуда по измерениям напряженности горизонтального магнитного поля легко оценить напряженность вертикального электрического. В случае использования импульсных сигналов атмосфериков оценивают напряженность их низкочастотной части (“хвоста”) в диапазоне ниже частоты первого поперечного резонанса Земля–ионосфера (1.5–1.8 кГц), которая распространяется на квази-ТЕМ-моде.

Оценку масштабирующего множителя k электрической антенны описанного здесь приемника мы проводили по данным, полученным в ходе нагревного эксперимента 2016 г. на стенде EISCAT/heating в г. Тромсе. В данном эксперименте проводился нагрев ионосферы мощным модулированным коротковолновым радиосигналом, в результате чего в ионосфере был образован источник электромагнитных волн с частотой модуляции коротковолнового сигнала. Для оценки k мы использовали результаты регистрации сигнала ионосферного источника на частоте 1017 Гц.

Калибровочные измерения проводились с использованием дискретного набора частот в диапазоне от 17 Гц до 16 кГц. Длительность проведения измерений на частоте 17 Гц составляла 30 мин, на 36 Гц – 20 мин, на 87 и 137 Гц – 10 мин, на всех остальных частотах – 5 мин. На рис. 3 приведены полученные таким образом оценки а.ч.х. и ф.ч.х. измери-

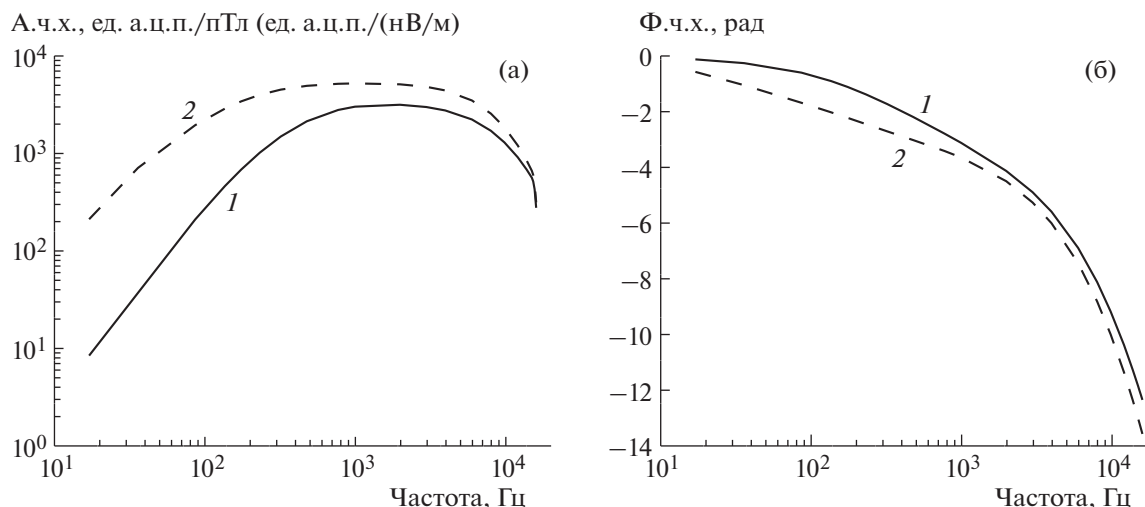


Рис. 3. А.ч.х. (а) и ф.ч.х. (б) измерительных каналов горизонтальной магнитной (1) и вертикальной электрической (2) компонент электромагнитного поля.

тельных каналов горизонтальной магнитной и вертикальной электрической компонент. Значения приведенных ф.ч.х. антенн являются абсолютными, т.е. в них учтена задержка, вносимая всем аналого-цифровым трактом.

Шумовые характеристики

Основным параметром регистрирующей аппаратуры, определяющим качество регистрации сигнала, является уровень собственных шумов измерительных каналов. Можно выделить два основных подхода к оценке уровня собственных шумов измерительных каналов. Первый основан на расчете значений приведенной к входу антенны спектральной плотности шума всего измерительного канала. При этом в расчетах используются шумовые модели операционных усилителей [19]. Второй основан на измерении собственных шумов канала при полном экранировании антенны или при подключении вместо антенны ее электрического эквивалента. Для исключения возможных ошибок мы использовали оба подхода.

Для реализации первого подхода были использованы эквивалентные схемы замещения антенн и шумовые модели операционных усилителей, взятые из технической документации микросхем. Электрические схемы эквивалентов антенн выделены на рис. 2 штриховыми линиями. Расчет шумов рамочных антенн проводился с учетом теплового шума провода антенны (R_a) и ее собственной индуктивности L_a . Электрический эквивалент антенны E_z представляет собой емкостную нагрузку c_a , соединенную с сопротивлением r_a и емкостью C_c соединительного кабеля антенны с предусилителем. При моделировании учитывался вклад шума

всех усилительных каскадов измерительных каналов. Результаты моделирования приведены на рис. 4 (кривые 2).

Так как для проведения измерений собственных шумов измерительных каналов антенную систему таких размеров экранировать от внешнего электромагнитного поля не представляется возможным, антенны были замещены эквивалентами. Для создания эквивалентов рамочных антенн были использованы тороидальные катушки индуктивности с ферритовым сердечником, соединенные последовательно с резистором. Эквивалент электрической антенны, соответственно, был собран из двух конденсаторов и резистора. Измерения собственных шумов проводились в штатном режиме работы приемника в течение 2 ч. Результаты измерений приведены на рис. 4 (кривые 1). На рис. 4 видно хорошее согласие результатов моделирования и измерений, что практически исключает вероятность систематической ошибки.

Также на рис. 4 для визуальной оценки отношения сигнал/шум приведены спектральные плотности мощности компонент H_x и E_z естественного электромагнитного поля: кривые 3, полученные по данным регистрации разработанным приемником в обсерватории “Ловозеро”, и кривые 4, взятые из работы [20]. Для расчета спектральной плотности по данным обсерватории “Ловозеро” были использованы данные регистрации от 24.06.2020 с 16 : 00 по 18 : 00 UT. Кривыми 4 приведены усредненные сглаженные спектры, характерные для временного интервала 08 : 00–12 : 00 UT летнего периода в Колорадо (США).

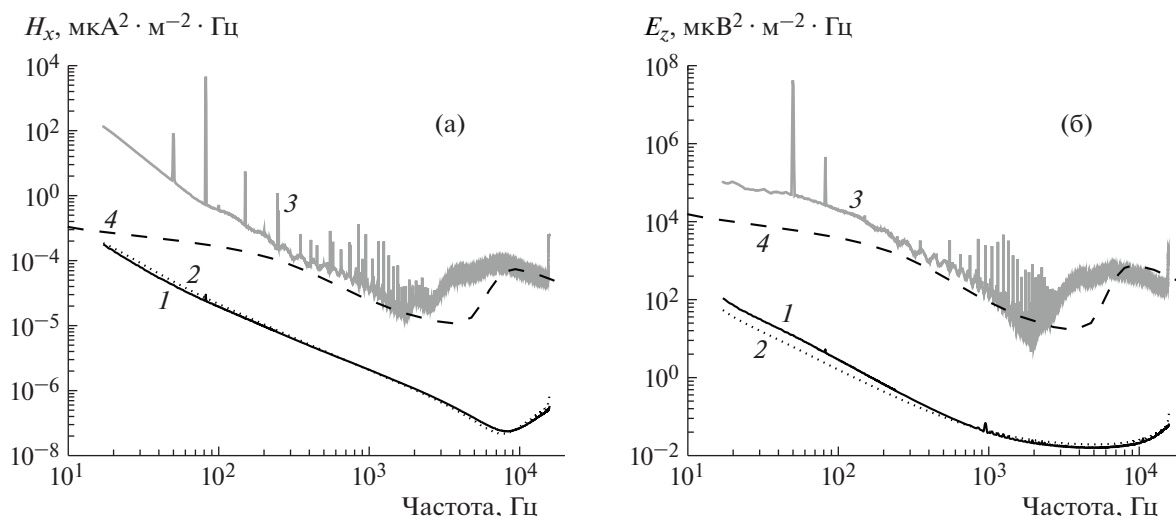


Рис. 4. Измеренные (1) и рассчитанные (2) приведенные к входу антенн спектральные плотности мощности собственных шумов измерительных каналов горизонтальной магнитной (а) и вертикальной электрической компонент (б) и соответствующие спектральные плотности мощности компонент естественного электромагнитного поля, построенные по данным измерений (3) и взятые из литературы (4).

На рис. 4 видно, что спектры естественного электромагнитного излучения, полученные при помощи разработанного приемника и из [20], близки по значениям. Этот факт подтверждает адекватность полученных в результате калибровки характеристик измерительных каналов разработанного приемника. При сравнении спектров собственных шумов измерительных каналов со спектрами компонент естественных электромагнитных полей видно, что в обоих компонентах во всем приведенном диапазоне частот уровень собственных шумов значительно ниже измеренного уровня естественного электромагнитного поля. Для измерительного канала компоненты H_y наблюдается аналогичная рис. 4а ситуация.

Перекрестные помехи

При проведении исследования с.н.ч./о.н.ч.-эмиссий используют параметры эллипса поляризации горизонтального магнитного поля, величину и направление вектора потока энергии, отношение $|E_z|/(H_x^2 + H_y^2)^{1/2}$ [3, 4, 17, 21]. Однако мощные сигналы, регистрируемые только одним из измерительных каналов приемника, могут оказывать влияние и на соседние каналы за счет паразитных индуктивных и емкостных связей, возникающих на платах усилителей, в линии передачи сигнала от антенн к регистратору и на платах блоков регистратора. Таким образом, одним из важных факторов снижения точности вычисления параметров электромагнитных эмиссий является величина перекрестной помехи.

Для оценки величины перекрестной помехи был проведен следующий эксперимент. На вход одной из рамочных антенн была подана калибровочная последовательность сигналов методом, аналогичным проведению калибровочных измерений (см. раздел “Частотные характеристики”). Калибровочный тороид был надет на рамочную антенну H_y . Эквивалентная величина магнитной индукции на входе антенны составляла 80 пТл. Чтобы избежать воздействия поля тороидальной катушки на вторую рамочную антенну, вместо нее был включен ее эквивалент (на рис. 2а выделен штриховой линией). Затем для каждой из частот мы провели оценку отношения амплитуды сигнала на выходе измерительного канала H_y к амплитудам сигналов, регистрируемых в других измерительных каналах (H_x , E_z). На рис. 5 приведены полученные таким образом зависимости $|H_y|/|H_x|$ и $|H_y|/|E_z|$ от частоты. Как видно из рисунка, для обоих каналов величина отношения амплитуд в рабочем диапазоне частот составляет не менее 70 дБ, что говорит о существовании слабой перекрестной помехи. Однако влияние такой помехи на результаты регистрации электромагнитных эмиссий незначительно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описан приемник, адаптированный для проведения непрерывных наблюдений компонент электромагнитного поля о.н.ч.-диапазона на сети высокоширотных станций, который позволяет регистрировать две горизонтальные магнитные и вертикальную электрическую

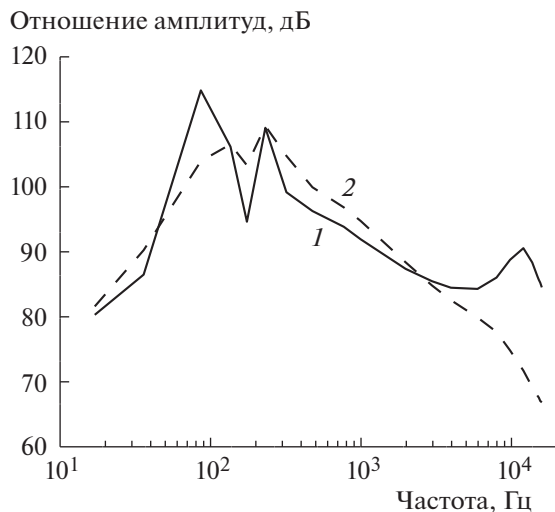


Рис. 5. Отношение амплитуды компоненты H_x к H_y (1) и E_z к H_y (2).

компоненты поля в диапазоне частот от 300 Гц до 15 кГц. Отличительными особенностями приемника являются гальваническое разделение цифровой и аналоговой частей, что позволяет свести к минимуму уровень промышленных помех в компоненте E_z , и прецизионная синхронизация каждого получаемого отсчета цифровых данных с мировым временем с максимальной ошибкой, не превышающей 1 мкс. Возможность регистрации трех компонент поля позволяет определять не только стандартный набор параметров регистрируемого электромагнитного поля (амплитуды и параметры эллипса поляризации), но и определять величину и направление вектора Пойнтинга, что значительно расширяет информативность наблюдений. Прецизионная синхронизация данных позволяет определить скорость распространения волн между приемниками, даже на короткой базе (150 км) [22].

Данные регистрации компонент электромагнитного поля, полученные при помощи разработанного приемника, использованы в большом числе публикаций по различным тематикам. Например, данные, полученные в ходе проведения экспериментов по модулированному нагреву ионосферы, были использованы для исследований процессов генерации и распространения о.н.ч.-волн в волноводе Земля–ионосфера [17, 18, 22]. Также данные регистрации естественных электромагнитных эмиссий были использованы в исследованиях процессов их генерации в магнитосфере [14, 21, 23–26]. Количество публикаций с использованием данных разработанного приемника подтверждает его работоспособность и востребованность проведения такого рода измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wait J.R. *Electromagnetic Waves in Stratified Media*. New York: Pergamon, 1970.
2. Burke C.P., Jones D.L. // *JGR: Atmospheres*, 1995. V. 100. № D12. P. 26263. <https://doi.org/10.1029/95JD02735>
3. Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Ларченко А.В., Пильгаев С.В. // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2015. Т. 55. № 6. С. 797. <https://doi.org/10.7868/S0016794015060085>
4. Лебедь О.М., Ларченко А.В., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В. // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2017. Т. 57. № 1. С. 57. <https://doi.org/10.7868/S0016794017010072>
5. Dowden R.L., Brundell J.B., Rodger C.J. // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2002. V. 64. № 7. P. 817. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00085-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00085-8)
6. Lay E., Holzworth R., Rodger C., Thomas J., Pinto J., Dowden R. // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. № 3. P. L03102. <https://doi.org/10.1029/2003GL018882>
7. Clilverd M., Rodger C., Thomson N., Brundell J., Ulich T., Lichtenberger J., Cobbett N., Seppälä A., Verronen P., Turunen E. // *Space Weather-the International J. Research and Applications*. 2009. V. 7. <https://doi.org/10.1029/2008SW000412>
8. Singh R., Veenadhari B., Cohen M., Pant P., Singh A., Maurya A., Vohat P., Inan U. // *Current science*. 2010. V. 2.
9. Chen Y., Yang G., Ni B., Zhao Z., Gu X., Zhou C., Wang F. // *Advances in Space Research*. 2016. V. 57. № 9. P. 1871. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.01.023>
10. Ларченко А.В., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В. // *Радиотехника и электроника*. 2015. Т. 60. № 8. С. 793. <https://doi.org/10.7868/S0033849415070116>
11. <http://www.unixnut.net/efield-nj.html>
12. Филатов М.В., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В. // *ПТЭ*. 2011. № 3. С. 73.
13. Shvets A., Serdiuk T., Schekotov A., Belyaev G., Krivonos A. // *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*. 2014. V. 7. P. 11.
14. Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В., Клейменова Н.Г., Маннинен Ю., Никитенко А.С., Ларченко А.В., Филатов М.В., Лебедь О.М., Фролов И.Е., Козелов Б.В. // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2020. Т. 60. С. 216. <https://doi.org/10.31857/S0016794020020121>
15. <http://savannah.nongnu.org/projects/lwip/>
16. Пильгаев С.В., Ларченко А.В., Филатов М.В., Федоренко Ю.В., Лебедь О.М. // *ПТЭ*. 2018. № 6. С. 49. <https://doi.org/10.1134/S0032816218060125>
17. Fedorenko Yu., Tereshchenko E., Pilgaev S., Grigoryev V., Blagoveshchenskaya N. // *Radio Science*. 2014. V. 49. № 12. P. 1254. <https://doi.org/10.1002/2013RS005336>
18. Ларченко А.В., Лебедь О.М., Благовещенская Н.Ф., Пильгаев С.В., Бекетова Е.Б., Федоренко Ю.В. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2019. Т. 62. № 6. С. 429.
19. <https://www.ti.com/lit/an/slva043b/slva043b.pdf>
20. <http://www.vlf.it/naturalnoise/naturalnoise-floor.htm>

21. Manninen J., Kleimenova N., Kozlovsky A., Kornilov I., Gromova L., Fedorenko Y., Turunen T. // *Annales Geophysicae*. 2015. V. 33. P. 991.
<https://doi.org/10.5194/angeo-33-991-2015>
22. Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Благовещенская Н.Ф., Ларченко А.В., Григорьев В.Ф., Пильгаев С.В. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2017. Т. 57. № 6. С. 751.
<https://doi.org/10.7868/S0016794017060062>
23. Маннинен Ю., Федоренко Ю.В., Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Никитенко А.С. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. Т. 54. № 1. С. 36.
<https://doi.org/10.7868/S0016794014010088>
24. Клейменова Н.Г., Маннинен Ю., Громова Л.И., Турунен Т., Федоренко Ю.В., Никитенко А.С., Зелинский Н.Р., Громов С.В. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015. Т. 55. № 3. С. 323.
<https://doi.org/10.7868/S0016794015030104>
25. Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Маннинен Ю., Клейменова Н.Г., Никитенко А.С. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2019. Т. 59. № 5. С. 618.
<https://doi.org/10.1134/S0016794019050079>
26. Demekhov A., Titova E., Maninnen J., Pasmanik D., Lubchich A., Santol'ik O., Larchenko A., Nikitenko A., Turunen T. // *JGR: Space Physics*. 2020. V. 125. № 5. P. e2020JA027776.
<https://doi.org/10.1029/2020JA027776>