# Результаты эксперимента по совмещённому (вертикальному и наклонному) зондированию ионосферы на ионозондах серии «Парус-А»

С.В. Литвинов<sup>1</sup>, И.А. Глинкин<sup>2</sup>, Е.А. Паньшин<sup>3</sup>, В.О. Скрипачев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, 119454, Россия E-mail: litvinov\_s@mirea.ru

<sup>2</sup> АО «НПК «НИИ дальней радиосвязи», Москва, 127083, Россия <sup>3</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова Москва, 129128, Россия

Работа посвящена проведённой серии экспериментов по исследованию ионосферы одновременно методами вертикального и наклонного зондирования с помощью отечественных ионозондов «Парус-А» в диапазоне частот от ~1 до 20 МГц. Это так называемый метод совмещённого зондирования ионосферы, при котором проводится одновременное излучение сигнала двумя ионозондами, тогда сигналы наклонного зондирования накладываются на ионограмму вертикального. Приводится информация о развёрнутой ионосферной сети Росгидромета, оснащённой такими ионозондами. Сеть состоит из 10 ионосферных станций, размещённых по всей территории России: от Калининграда до Петропавловска-Камчатского. Отечественные ионозонды серии «Парус-А» стали основой для переоснащения ионосферных станций Росгидромета. С 2010 по 2015 г. изготовлено 12 экземпляров. Эксперимент по совмещённому зондированию ионосферы проводился на всех радиотрассах между ионозондами «Парус-А»: в центральной России, в сибирском регионе и на Дальнем Востоке, а также на радиотрассе Москва-Салехард. Анализируются полученные результаты проведённого эксперимента по совмещённому зондированию ионосферы. Делается предположение о возможности и целесообразности дистанционной поверки ионозонда как средства измерения. Описываются некоторые перспективы развития экспериментов для следующего поколения ионозондов.

Ключевые слова: ионозонд, вертикальное зондирование, наклонное зондирование, эксперимент

Одобрена к печати: 15.02.2023 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-309-319

## Введение

Актуальность проблемы изучения воздействия ионосферы на распространение электромагнитных волн определяется необходимостью решения задач дальней радиолокации, радионавигации и связи, а также проблемами диагностики структуры среды распространения ионосферы. Распространение радиоволн в ионосфере имеет свои особенности, которые определяют принципы проектирования и эксплуатации наземных систем декаметровой радиосвязи и загоризонтной радиолокации (Боев и др., 2020; Заикин и др., 2016). Важно их учитывать также при создании спутниковых систем связи и навигации, поскольку ионосфера оказывает значительное влияние на прохождение сигналов ГНСС (Глобальная система спутниковой навигации) (Горбунов и др., 2022).

Ионосфера выступает определяющим фактором при решении задач распространения радиоволн коротковолнового диапазона. При этом ионосфера не представляет собой статический объект: с высотой сильно изменяется её структура и свойства. Волновое и корпускулярное излучение Солнца напрямую влияет на процессы, протекающие в ионосфере, так же как и вариации магнитного поля Земли, процессы в магнитосфере, движение верхней атмосферы и т.д. Именно это становится причиной сильной изменчивости ионосферы в зависимости от географических координат, а также от времени суток, сезонности, циклов солнечной активности. Несмотря на возрастающую популярность исследования ионосферы с применением средств космического базирования (Скрипачев и др., 2016), самым информативным остаётся метод вертикального зондирования ионосферы наземными станциями. В России за последнее десятилетие воссоздана сеть ионосферного зондирования, оснащённая отечественной аппаратурой (Гивишвили и др., 2013).

# Ионозонд «Парус-А»

Ионозонд «Парус-А», разработанный в 2010 г. Институтом земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН) (совместно с ООО Научнотехнический центр «Радикон-М») по заказу Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (ИПГ), стал базовым для ионосферной сети Росгидромета (Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды). Внешний вид ионозонда приведён на рис. 1. Опыт эксплуатации ионосферной сети из десяти отечественных ионозондов «Парус-А» показал исключительную устойчивость работы и проведения измерений ионосферы методом вертикального зондирования даже в условиях возмущений — ионосферных бурь, F-рассеяний, наклонных отражений, волн широкого спектра и т.д. При этом он не только не уступает западным образцам, таким как DPS-4 (англ. Digisonde Portable Sounder, США) и CADI (англ. Canadian. Advanced Digital Ionosonde, Канада), но даже превосходит их (Кузьмин, Канаев, 2012). В точности же оцениваемых характеристик, оперативности обработки и доведения конечной информации до потребителя он сравним с ними. Ионозонд «Парус-А» представляется легитимным средством измерений в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. Испытания в целях утверждения его в качестве сертифицированного средства определения характеристик ионосферы методом вертикального зондирования были успешно завершены в 2012 г. (свидетельство об утверждении типа средств измерений RU. C.35.001.А № 48409 от 12.10.2012). Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) выдало свидетельство на утверждённый тип (номер в Госреестре СИ 51425-12), в соответствии с которым ионозонды выпускались в течение 5 лет (Минлигареев и др., 2012).



Рис. 1. Внешний вид ионозонда «Парус-А»

Эти ионозонды отлично выполняют возложенные на них задачи по получению ионограмм вертикального зондирования. В дополнение к вертикальному целесообразно выполнять и наклонное зондирование, которое может существенно расширить возможности ионозонда. К сожалению, ионозонды DPS-4 и CADI, упомянутые выше, из-за малой мощности излучаемого сигнала не приспособлены для решения этой задачи.

Ионозонд «Парус-А», также имевший целевой функцией вертикальное зондирование ввиду заложенного на этапе разработки потенциала, после модернизации оказался способен осуществлять наклонное зондирование. При этом передающие антенны имеют преимущественно диаграмму направленности в зенит, однако при существенной мощности излучения (~10 кВт в импульсе) даже этих небольших боковых лепестков достаточно для уверенного приёма сигналов на удалении больше 1000 км (Корляков др., 2022). За счёт сигналов системы единого времени (СЕВ) и, соответственно, синхронизации нескольких ионозондов «Парус-А» появилась возможность осуществлять наклонное зондирование между станциями, размещёнными на расстоянии более 2000 км. В таком режиме их собственный передатчик не выключается и следы наклонного зондирования на ионограмме накладываются на следы вертикального, осуществляется так называемое совмещённое (комплексное) зондирование. Первые эксперименты на ионозондах «Парус-А» датируются 2013 г. и описаны в ряде статей (например, (Гивишвили и др., 2015)). С 2017 г. серия экспериментов продолжилась, охватив ионозонды сети по всей стране.

## Результаты эксперимента

С 2011 г. ионосферная сеть, оснащённая ионозондами «Парус-А» (*таблица*), работает в непрерывном режиме, автоматически проводя вертикальное зондирование каждые 15 мин, с ручной обработкой каждой часовой ионограммы. На *рис. 2* приведено взаимное размещение ионозондов. Как видно на *рис. 2*, часть ионозондов находится на расстоянии от ~1000 до 1700 км, оптимальном для наклонного зондирования (H3). Также из *рис. 2* видно удобное объединение ионозондов по географическому признаку, что позволяет объединить ионозондовды европейской части России, в Сибири и на Дальнем Востоке в региональные «подсети».



Рис. 2. Расположение ионозондов «Парус-А» ионосферной сети Росгидромета (ИПГ)

Название	Шифр	Размещение	Регион	Год	Координаты, °с.ш.; °в.д.
Moscow	MA155	г. Троицк	Московская обл.	2010	55,49; 37,29
Tunguska	TZ362	пос. Бор	Красноярский край		61,60; 90,00
Rostov	RV149	г. Ростов-на-Дону	Ростовская обл.	2011	47,20; 39,70
Elektrougli	MO156	пос. Тимохово	Московская обл.		55,80; 38,30
Magadan	MA560	пос. Палатка	Магаданская обл.	2014	60,09; 150,93
Salekhard	SH266	г. Салехард	Ямало-Ненецкий АО		66,50; 66,50
Novosibirsk	NV355	пос. Коченево	Новосибирская обл.	2015	54,80; 83,20
Kaliningrad	KL154	пос. Ладушкин	Калиниградская обл.		54,40; 20,10
Petropavlovsk	PK553	с. Паратунка	Камчатский край		52,95; 158,23
Khabarovsk	KB547	пос. Вяземский	Хабаровский край		48,50; 135,10

Размещение ионозондов	«Парус-А» на	а территории	России
-----------------------	--------------	--------------	--------

## Европейская часть России

Практически с начала запуска работы сети вертикального зондирования велись работы по реализации наклонного зондирования между станциями сети. Первой трассой H3 в 2013 г. стала Москва – Ростов-на-Дону. Затем, после проведённой модернизации, появилась возможность уверенно проводить сеансы H3 в экспериментальном режиме, при этом не создавая помех целевой функции сети — вертикальному зондированию (Котонаева и др., 2019). Отдельно стоит отметить, что основные эксперименты по совмещённому зондированию проведены в 2017–2018 гг. и единичные — в 2019 и 2020 гг. Это соответствует периоду спада солнечной активности 24-го солнечного цикла, минимум которой пришёлся на 2020 г.



*Рис. 3.* Данные комплексного зондирования ионосферы по трассе Калиниград – Москва 07.11.2017 в 09:15 UT (*англ.* Universal Time, всемирное время)



*Рис. 4.* Данные комплексного зондирования ионосферы по трассе Электроугли – Ростов-на-Дону 17.10.2017 в 13:45 UT



*Рис. 5.* Данные комплексного зондирования ионосферы по трассе Калиниград – Электроугли 30.10.2018 в 07:30 UT

В ходе эксперимента удалось провести сеансы НЗ между станциями в городах Троицке и Калининграде (*puc. 3*) (ионозонды разделяет 952 км). Из ионограммы видно, что следы слева и справа похожи. Это говорит о том, что трассы прохождения сигналов идентичны. Также стоит отметить яркую выраженность следов, что даёт основание сделать вывод о достаточной мощности сигнала, излучаемого боковыми лепестками, и хорошей чувствительности приёмного тракта.

Затем к эксперименту подключился ионозонд, развёрнутый на полевой экспериментальной базе (ПЭБ) «Электроугли», что позволило проверить ещё две трассы: Электроугли – Ростов-на-Дону (*puc. 4*, см. с. 312) и Электроугли – Калининград (*puc. 5*). Таким образом, в очередной раз подтвердилась стабильность НЗ ионозондами «Парус-А».

#### Сибирская часть России

В сибирской части России на удалении, достаточном для проведения H3, расположены три ионозонда: в Салехарде, близ Новосибирска и в пос. Бор Красноярского края. При проведении эксперимента выявился ряд особенностей. Так, станция, размещённая в г. Салехарде, из-за своего северного расположения оказалась чувствительна к нестабильной ионосфере, к тому же она удалена от других ионозондов на 1200–1500 км. Определённое влияние на качество приёма – передачи сигнала оказало расположение приёмных антенн. В ионозондах серии «Парус-А» для приёма отражённых сигналов применяется антенна типа «поляризованный диполь», диаграмма направленности которой обладает ориентацией по углу места и ярко выраженными экстремумами в азимутальной плоскости.

Важно отметить, что эксперименты проводились при ограничениях, обусловленных спецификой работы ионосферной сети: результаты зондирования должны поступать потребителям с заданной периодичностью — 15 мин. Поэтому работы проводились либо в перерывах, либо одновременно со штатной работой. Несмотря на это, эксперимент все же удалось выполнить. При проведении сеансов НЗ на трассе Салехард – Новосибирск на ст. Новосибирск наблюдался уверенный приём сигнала, при том что в обратном направлении сигнал приёмником в Салехарде не обнаруживался (расстояние между станциями — 1578 км). Аналогичная ситуация отмечена на трассе Салехард – Подкаменная Тунгуска (расстояние — 1258 км): ионозонд в Салехарде регистрировал сигналы передатчика Подкаменной Тунгуски, при этом прохождение сигнала из Салехарда в Подкаменную Тунгуску приёмник не фиксировал.

## Дальневосточная часть России

На Дальнем Востоке успешно проведено НЗ между ионозондами в Магадане и Петропавловске-Камчатском, которые разделяет 910 км. Результат работы этих станций по НЗ показан на *рис. 6.* После тестового эксперимента в 2017 г. эксперименты продолжились в расширенном формате в 2018 г.



*Рис. 6.* Данные комплексного зондирования ионосферы по трассе Магадан – Петропавловск-Камчатский 08.11.2018 в 04:45 UT



*Рис.* 7. Данные комплексного зондирования ионосферы по трассе Магадан – Петропавловск-Камчатский 08.11.2018 в 07:15 UT



*Рис. 8.* Данные комплексного зондирования ионосферы по трассе Магадан – Хабаровск 10.11.2018 в 05:15 и 07:15 UT

В частности, проводились опыты по дистанционной поверке одного ионозонда другим — эталонным (Минлигареев и др., 2021). Суть метода заключается во взаимной передаче сигнала методом наклонного зондирования с поверенной станции и с поверяемой станции и последующем анализе полученных данных.

Позднее появилась возможность проводить суточные измерения в режиме совмещённого зондирования на нескольких трассах. В результате сформировалась статистика, позволяющая оценить изменения высотно-частотной характеристики за продолжительный период времени. Также проведённый эксперимент подтвердил надёжность работы аппаратуры в режиме совмещённого зондирования, при этом без создания помех вертикальному зондированию.

Например, на трассе Магадан – Петропавловск-Камчатский проведён именно такой эксперимент (*puc.* 7, см. с. 314). Протяжённость трассы — 910 км. После захода солнца для наклонного зондирования отмечается уменьшение критических частот и высоты отражающего слоя, что подтверждается ионограммой вертикального зондирования. В отдельных

случаях уже после захода солнца ещё некоторое время (около двух часов) сохранялось активное наклонное зондирование, тогда как следы вертикального практически отсутствовали. Активность передатчика на ст. Магадан доказывается присутствием следов на ионограмме в Петропавловске-Камчатском.

На трассе Магадан – Хабаровск (расстояние 1747 км) проведён аналогичный эксперимент (*рис. 8*, см. с. 315). Расстояние между станциями — практически предельное для выполнения наклонного зондирования ионозондом такого типа. Отдельно стоит отметить устойчивое наклонное зондирование в моменты времени, когда следы вертикального практически не регистрируются.

### Отдельные случаи

Особняком стоит трасса Москва – Салехард, не вписывающаяся в территориальное деление. Интересно, что практически на предельной дальности (около 2000 км) и при изменчивости высокоширотной ионосферы сигналы НЗ регистрировались стабильно.



Рис. 9. Данные комплексного зондирования ионосферы по трассе Москва – Салехард 07.11.2017 в 12:00 UT



Рис. 10. Данные комплексного зондирования ионосферы, полученные ионозондами на ст. ИЗМИРАН-Троицк (*a*), ст. ИЗМИРАН-Калининград (*б*, поляризационный приём) и ст. Электроугли (*в*) 30 октября 2018 г. в 07:59 UT

В 2017 и 2018 гг. проведены эксперименты на этой трассе, показавшие надёжность связи между данными станциями. Результат приведён на *рис. 9*. Следы на частотах от 10 МГц и на высотах ~1100 км — это следы наклонного зондирования. Из-за сжатия по высоте ионограмма наклонного зондирования также сжата, однако при увеличении она отлично просматривается.

Любопытный результат получен в европейском секторе на трассе Москва – Калининград. В московском регионе развёрнуты сразу два ионозонда: близ г. Электроугли на ПЭБ ИПГ и на базе ИЗМИРАН в г. Троицке. Таким образом, в результате синхронизации работы трёх ионозондов получены интересные результаты: на ионограмме в Калининграде на ложились следы сразу двух ионозондов (*puc. 10*). При этом на ионограмме явно различаются следы вертикального зондирования и следы НЗ двух московских ионозондов. Расстояние от станции в Калиниграде до ионозонда в Электроуглях хоть и ненамного, но больше, чем до ионозонда в Троицке, что выражается в разной высоте следов НЗ на ионограмме.

## Заключение

Проведённая серия экспериментов подтвердила возможность выполнять устойчивое комплексное зондирование ионосферы на ионозондах серии «Парус-А», не создавая помех вертикальному зондированию. Результат достигнут с несущественными доработками, которые заключались в модернизации программного обеспечения, при заложенном на этапе разработки потенциале.

Дальнейшим развитием работ видится проверка всех возможных трасс наклонного зондирования на существующих ионозондах «Парус-А», экспериментальные работы по дистанционной поверке ионозондов, составление теоретической и экспериментальной базы для разработки нового поколения ионосферных станций.

## Литература

- 1. *Боев С. Ф., Рахманов А. А., Линкевичиус А. П., Якубовский С. В., Володин П. В.* Создание и эксплуатация радиолокационных станций дальнего обнаружения // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 5. С. 35–48. DOI: 10.21778/2218-5453-2020-5-35-48.
- 2. Гивишвили Г. В., Крашенниников И. В., Лещенко Л. Н., Власов Ю. М., Кузьмин А. В. Ионозонд «Парус-А»: функциональные возможности и перспективы развития // Гелиогеофиз. исслед. 2013. № 4. С. 68–74.
- Гивишвили Г. В., Крашенниников И. В., Лещенко Л. Н. Ионозонд «Парус-А»: новый измерительный комплекс ИЗМИРАН // Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли: Юбилейный сб. ИЗМИРАН-75 / под ред. В.Д. Кузнецова. М.: ИЗМИРАН, 2015. С. 150–159.
- 4. Горбунов Р. В., Скрипачев В. О., Литвинов С. В., Тарадаев С. В. Возможности малых космических аппаратов для проведения радиозатменных измерений ионосферы // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехн. и инфокоммуникац. систем («Радиоинфоком-2022»): сб. науч. ст. по материалам 6-й Международ. научно-практ. конф. Москва, 6–10 июня 2022. М.: МИРЭА Российский технолог. ун-т, 2022. С. 80–85.
- 5. Заикин Б.А., Богадаров А.Ю., Котов А.Ф., Попонов П.В. Оценивание координат воздушной цели в дальномерной многопозиционной радиолокационной системе // Российский технолог. журн. 2016. Т. 4. № 2. С. 65–72. DOI: 10.32362/2500-316X-2016-4-2-65-72.
- 6. Корляков Д. С., Литвинов С. В., Семёнова О. В. Антенная система современного ионозонда комплексного зондирования // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехн. и инфокоммуникац. систем («Радиоинфоком-2022»): сб. науч. ст. по материалам 6-й Международ. научнопракт. конф. Москва, 6–10 июня 2022. М.: МИРЭА Российский технолог. ун-т, 2022. С. 91–95.
- 7. Котонаева Н. Г., Денисова В. И., Паньшин Е. А., Литвинов С. В., Глинкин И. А. Результаты эксперимента по комплексному зондированию ионосферы на ионозондах серии «Парус-А» ионосферной сети Росгидромет // Всероссийская открытая науч. конф. «Современные проблемы дистанц. зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Всероссийские открытые Армандовские чтения: материалы конф. 28–30 мая 2019, Муром, Россия. 2019. С. 326–335.

- 8. *Кузьмин А. В., Канаев А. С.* Средства вертикального радиозондирования ионосферы // Гелиогеофиз. исслед. 2012. № 2. С. 72–82.
- 9. *Минлигареев В. Т., Паньшин Е.А., Чурилов С. Н.* Проведение испытаний в целях утверждения типа ионозондов «Парус-А» // Гелиогеофиз. исслед. 2012. № 2. С. 40–46.
- 10. Минлигареев В. Т., Качановский Ю. М., Кравченок В. Л., Паньшин Е. А., Хотенко Е. Н. Метрологическое обеспечение ионосферной, магнитной наблюдательной сети Росгидромета // Метеорология и гидрология. 2021. № 4. С. 43–52.
- 11. Скрипачев В. О., Суровцева И. В., Барсуков А. И., Полушковский Ю. А., Пирхавка А. П. Анализ и обработка данных бортовой геофизической аппаратуры для оценки сейсмо-ионосферной возмущенности // Информатика: проблемы, методология, технологии. 2016. С. 329–334.

# Results of the experiment on the combined (vertical and oblique) sounding of the ionosphere by Parus-A ionosondes

S. V. Litvinov<sup>1</sup>, I. A. Glinkin<sup>2</sup>, E. A. Panshin<sup>3</sup>, V. O. Skripachev<sup>1</sup>

 <sup>1</sup> MIREA — Russian Technological University, Moscow 119454, Russia E-mail: litvinov\_s@mirea.ru
<sup>2</sup> AO Distant Radiocommunication Scientific Research Institute Moscow 127083, Russia
<sup>3</sup> Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow 129128, Russia

The work is devoted to a series of experiments on the study of the ionosphere simultaneously by methods of vertical and oblique sounding with the help of domestic Parus-A ionosondes in the frequency range from ~1 to 20 MHz. This is the so-called method of combined sounding of the ionosphere, in which simultaneous emission of signals by two ionosondes is performed, then the signals of oblique sounding are superimposed on the ionogram of the vertical one. Information is given about the deployed ionosphere network of Roshydromet equipped with such ionosondes. The network consists of 10 ionosonde stations located over the whole territory of Russia: from Kaliningrad to Petropavlovsk-Kamchatsky. Parus-A series ionosondes became the basis for re-equipment of ionospheric stations of Roshydromet. From 2010 to 2015, 12 units were made. Experiments on combined sounding of ionosphere were conducted on all radiotracks between Parus-A ionosondes: in central Russia, Siberia and the Far East, as well as on the Moscow-Salekhard radiotrack. The results of the combined sounding of the ionosphere are analyzed. An assumption on the possibility and expediency of remote verification of the ionosonde as a measuring instrument is made. Some prospects for the development of the experiments for the next generation of ionosondes are discussed.

Keywords: ionosonde, vertical sounding, oblique sounding, experiment

Accepted: 15.02.2023 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-309-319

#### References

- 1. Boev S. F., Rakhmanov A. A., Linkevichius A. P., Yakubovskii S. V., Volodin P. V., Creation and operation of long-range detection radar, *Voprosy radioelektroniki*, 2020, No. 5, pp. 35–48 (in Russian), DOI: 10.21778/2218-5453-2020-5-35-48.
- 2. Givishvili G.V., Krashenninikov I.V., Leshchenko L.N., Vlasov Yu.M., Kuzmin A.V., Ionosonde "Parus-A": features and prospects, *Geliogeofizicheskie issledovaniya*, 2013, No. 4, pp. 68–74 (in Russian).
- 3. Givishvili G.V., Krashenninikov I.V., Leshchenko L.N., Ionosonde Parus-A: new ionospheric metering complex IZMIRAN, *Electromagnetic and Plasma Processes from the Solar to the Earth's Interior, Yubileinyi sbornik IZMIRAN-75*, V.D. Kuznetsov (ed.), Moscow: IZMIRAN, 2015, pp. 150–159 (in Russian).
- 4. Gorbunov R. V., Skripachev V. O., Litvinov S. V., Taradaev S. V., Opportunities of small satellites for radio occultation techniques for probing the ionosphere, *Sbornik nauchnykh trudov Radioinfokom-2022* (Collection of scientific papers Radioinfocom-2022), 2022, pp. 80–85 (in Russian).

- Zaikin B. A., Bogadarov A. Yu., Kotov A. F., Poponov P. V., Evaluation of coordinates of air target in a twoposition range measurement radar, *Russian Technological J.*, 2016, Vol. 4, No. 2, pp. 65–72 (in Russian), DOI: 10.32362/2500-316X-2016-4-2-65-72.
- 6. Korlyakov D. S., Litvinov S. V., Semenova O. V., Antenna system of a modern ionosone of combined sounding, *Sbornik nauchnykh trudov Radioinfokom-2022* (Collection of scientific papers Radioinfocom-2022), 2022, pp. 91–95 (in Russian).
- Kotonaeva N. G., Denisova V. I., Panshin E. A., Litvinov S. V., Glinkin I. A., Results of the experiment on complex sounding of the ionosphere on ionosondes of the "Parus-A" series of the Roshydromet ionospheric network, *Vserossiiskie otkrytye Armandovskie chteniya* (All-Russia Open Armandov Readings), 2019, pp. 326–335 (in Russian).
- 8. Kuz'min A. V., Kanaev A. S., Means of vertical radiosounding of the ionosphere, *Geliogeofizicheskie issledo-vaniya*, 2012, No. 2, pp. 72–82 (in Russian).
- 9. Minligareev V.T., Panshin E.A., Churilov S.N., Conducting tests for type approval of ionosondes "Parus-A", *Geliogeofizicheskie issledovaniya*, 2012, No. 2, pp. 40–46 (in Russian).
- 10. Minligareev V.T., Kachanovskii Yu.M., Kravchenok V.L., Pan'shin E.A., Khotenko E.N., Metrological support for the roshydromet ionospheric and magnetic observation network, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2021, No. 4, pp. 43–52 (in Russian).
- 11. Skripachev V.O., Surovtseva I.V., Barsukov A.I., Polushkovskii Yu.A., Pirkhavka A.P., Analysis and processing of data from onboard geophysical instrumentation for the assessment of seismic-ionospheric disturbance, *Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii* (Informatics: problems, methodology, technology), 2016, pp. 329–334 (in Russian).