

Результаты эксперимента по комплексному зондированию ионосферы на ионозондах серии «Парус-А» ионосферной сети Росгидромета

Н.Г. Котонаева¹, В.И. Денисова¹, Е.А.Паньшин¹, С.В. Литвинов^{1,2}, И.А. Глинкин²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова», г. Москва

² ОАО «Научно-производственный комплекс «Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи», г. Москва

Исследование ионосферы и изменения ее характеристик в режиме реального времени необходимо для всех радиосредств, работающих в диапазоне коротких волн. Для этой цели в новейшей России воссоздана сеть вертикальных ионозондов, которые также способны осуществлять наклонное зондирование ионосферы. В статье дается обоснование необходимости непрерывного отслеживания параметров ионосферы и приводятся некоторые основные ее характеристики. Демонстрируются результаты экспериментального наклонного зондирования и проводится их анализ. Кратко приводятся основные методы определения характеристик ионосферы. Рассматривается возможность применения этих результатов в целях ионосферного обеспечения радиолокаторов загоризонтного обнаружения.

Введение

Мониторинг космической погоды на сегодняшний день является чрезвычайно актуальной темой. Этим уже занимаются 14 стран в рамках Международной службы окружающей космической среды, с российской стороны за это отвечает Институт прикладной геофизики. Одним из направлений деятельности института является изучение и исследование ионосферы, с целью предоставления гелиогеофизической информации потребителям.

С 2011 года в России активно разворачивается сеть станций вертикального радиозондирования ионосферы, основу которых составляют новейшие ионозонды отечественного производства. На текущий момент развернуто десять таких станций по всей территории страны: от Калининграда до Камчатки. В течение всего срока работы в круглосуточном режиме ионозонды поставляют каждые 15 минут актуальную информацию о состоянии ионосферы. Проведенная модернизация и последующие опыты показали, что эти ионозонды способны выполнять также наклонное зондирование. Этот результат был достигнут благодаря привязке всех отдельных станций к Системе Единого Времени (СЕВ), а также мощному излучателю (10 кВт), сигнал которого через боковые лепестки диаграммы направленности распространяется и может быть принят на расстоянии до 2000 км.

Следует отметить, что в России на регулярной основе исследование ионосферы методом наклонного зондирования осуществляется ААНИИ (Арктический и антарктический научно-исследовательский институт). Сеть, оснащенная канадскими ионозондами CAD1 и ЛЧМ-ионозондами отечественного производства, расположена преимущественно на берегу Северного ледовитого океана. Также на территории России размещены несколько дигизондов DPS-4 (производство США), входящие в мировую ионосферную сеть и проводящие только вертикальное зондирование ионосферы. Кроме того, отдельными организациями и инициативными группами проводятся разработки собственных средств зондирования ионосферы, к сожалению, не получившими широкого распространения.

Основные параметры ионосферы

Одним из самых распространенных видов представления информации об ионосфере является ионограмма. Это, как правило, график, показывающий зависимость высоты отражающего слоя ионосферы от частоты. Вместе с графиком потребителям предоставляется и другая информация, определяемая во время зондирования. Подробное описание всех параметров, получаемых в процессе зондирования приведено в Руководстве по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям, выпущенным ИПГ [1]. Эти параметры определяются автоматически и, при необходимости, уточняются оператором. Пример типичной ионограммы и предоставляемых характеристик представлен на рисунке 1.

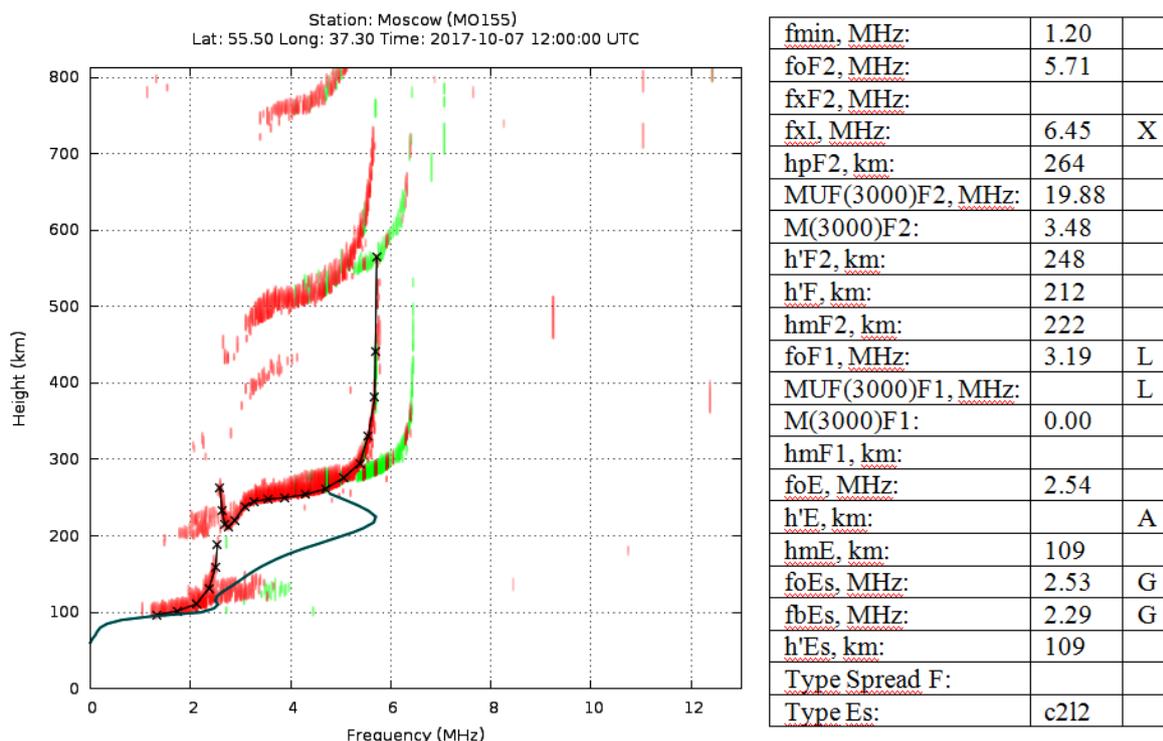


Рис. 1. Типичная ионограмма и характеристики ионосферы.

На ионограммах почти всегда видны несколько похожих друг на друга следов отражений, так называемых «кратников». Такие отражения получаются, когда импульсы проходят от 2 до 3 раз (а иногда и больше) между станцией и ионосферой. Действующая высота отражений 2-й (3-й) кратности будет в 2 (3) раза больше действующей высоты отражения основного (1-го) отражения. Все числовые характеристики обычно снимаются по отражениям 1-й кратности, т.е. по основному следу [2]. Также на ионограмме присутствует высотный профиль концентрации электронов ($N_e(h)$ -профиль ионосферы).

Основными ионосферными параметрами являются:

1. $foF2$ – критическая частота O-компоненты, отраженной от самого высокого слоя – F2;
2. $hmF2$ – минимальная действующая высота слоя F2;
3. $M3000F2$ – коэффициент, показывающий отношение максимально применимой частоты (МПЧ), отражающейся от слоя F2 при наклонном падении на расстояние скачка, равное 3000 км, к критической частоте $foF2$.

Эти параметры изменяются в зависимости от времени суток, времени года, а также 11-летнего цикла солнечной активности, поэтому отслеживание их изменений является

важной задачей. На рисунках 2, 3, 4 приведены изменения этих параметров ионосферы в московском регионе в течение 2018 года.

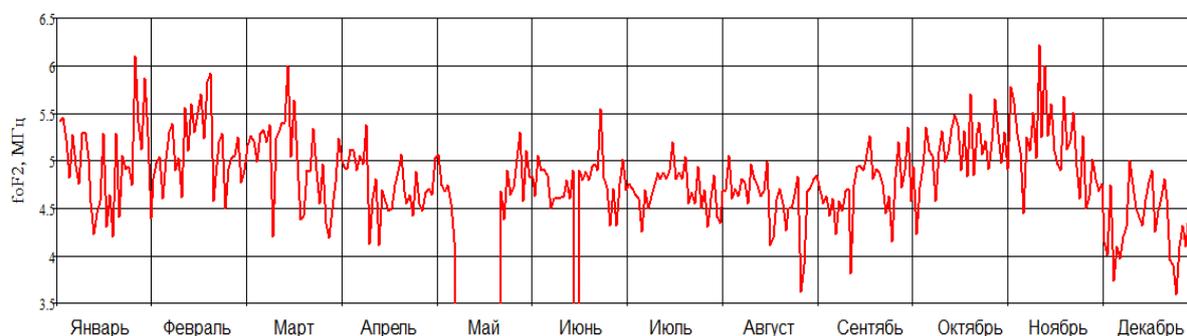


Рис. 2. График изменения параметра f_oF_2 в течение 2018 года над Москвой.

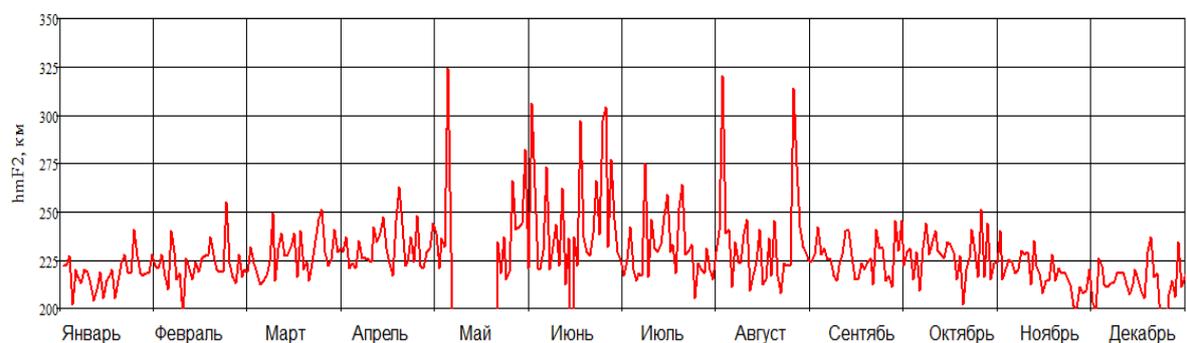


Рис. 3. График изменения параметра h_mF_2 в течение 2018 года над Москвой.

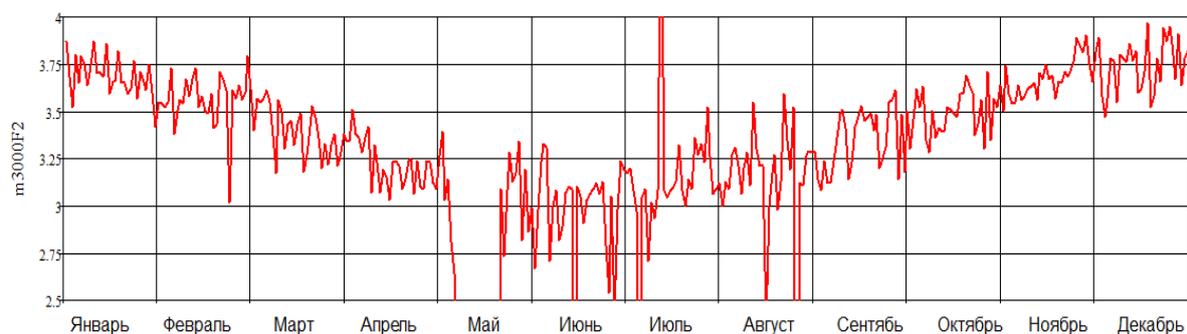


Рис. 4. График изменения параметра $M(3000)F_2$ в течение 2018 года над Москвой.

Комплексное зондирование ионосферы

Использование сетевых ионозондов в экспериментальных целях накладывает ограничения на изменение параметров зондирования. Т.е. ни в коем случае нельзя оставить заинтересованных потребителей без актуальной информации. Это означает, что пропуск сеанса зондирования недопустим, станция должна выйти в эфир, а, следовательно, передатчик не отключается. В результате получен совершенно уникальный результат, выраженный в том, что следы наклонного зондирования накладываются на следы вертикального отражения (т.н. комплексное зондирование) [3]. Пример комплексного зондирования представлен на рисунке 5.

На рисунке кроме ионограммы вертикального зондирования присутствуют следы, начинающиеся на частоте ~ 8 МГц и находящиеся на высоте 600 км. Это результаты приема сигнала другого ионозонда, а именно: приёмник ионозонда «Парус-А», расположенного в Москве, регистрирует следы передатчика «Парус-А», расположенного в Калининграде, и наоборот. Расстояние между ионозондами – 1093 км.

Высоты 600 км обуславливается тем, что ионозонд измеряет не высоту напрямую, а задержку возврата сигнала. С учетом угла отражения сигнала от ионосферы (от 140° до 160°) получается реальное расстояние между ионозондами.

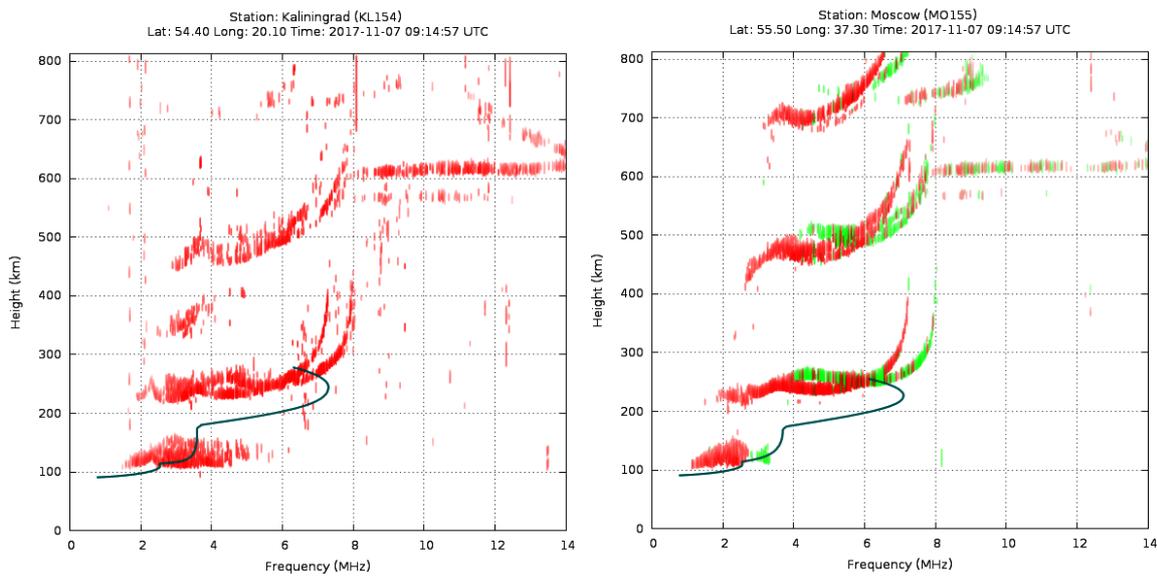


Рис. 5. Данные комплексного радиозондирования ионосферы, полученные ионозондами на ст. ИЗМИРАН-Калининград (слева, совмещенная линейная антенна) и ст. ИЗМИРАН-Троицк (справа, поляризационный прием) 17 ноября 2017 г 14:57 UTC.

Результаты эксперимента

Имеющееся количество и географическое расположение ионозондов позволило провести различные эксперименты по наклонному зондированию ионосферы. Всего на данный момент развернуто десять ионозондов: Троицк, Ростов-на-Дону, Электроугли, Подкаменная Тунгуска, Магадан, Калининград, Салехард, Новосибирск, Хабаровск, Петропавловск-Камчатский. Размещенные в разных частях России, такие ионозонды отличным образом объединяются в отдельные сектора: в европейской части, в Сибири и на Дальнем Востоке (рис. 6).

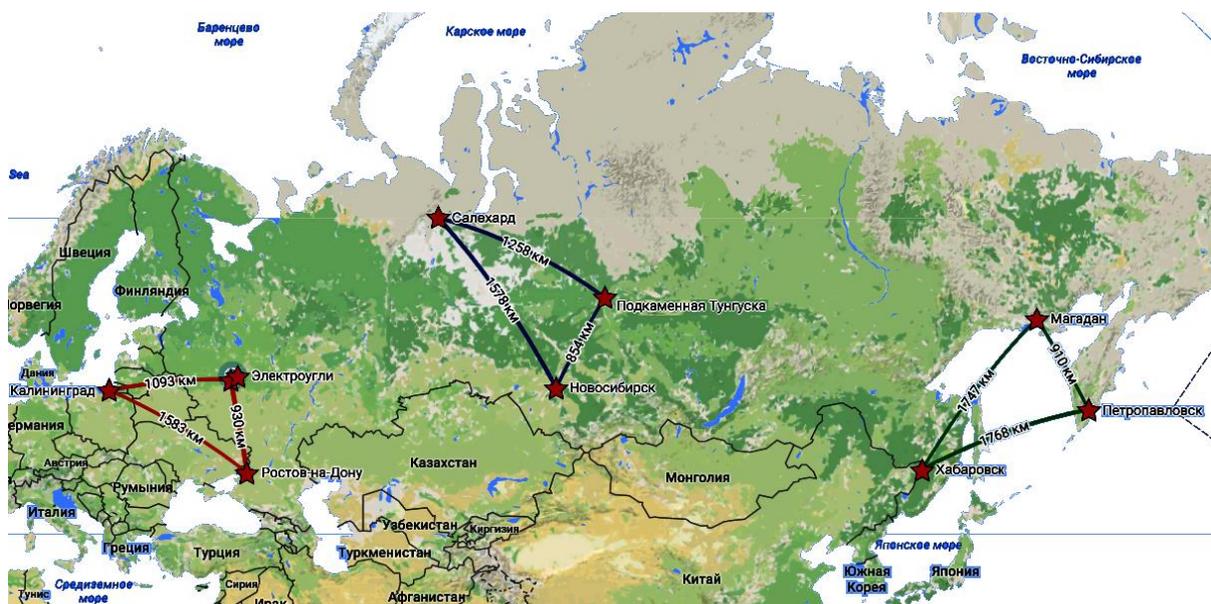


Рис. 6. Расположение ионозондов «Парус-А» и основные трассы экспериментального наклонного зондирования.

В 2017 году протестированы трассы всех секторов, а также трасса Москва-Салехард [4]. В каждом случае наблюдается устойчивый прием сигнала и отображение результатов в виде следов наклонного зондирования (НЗ). На рисунке 7 представлены результаты наклонного зондирования по трассам: (а) – Троицк – Калининград, (б) – Ростов-на-Дону – Электроугли, (в) – Магадан – Петропавловск-Камчатский, (г) – Троицк – Салехард.

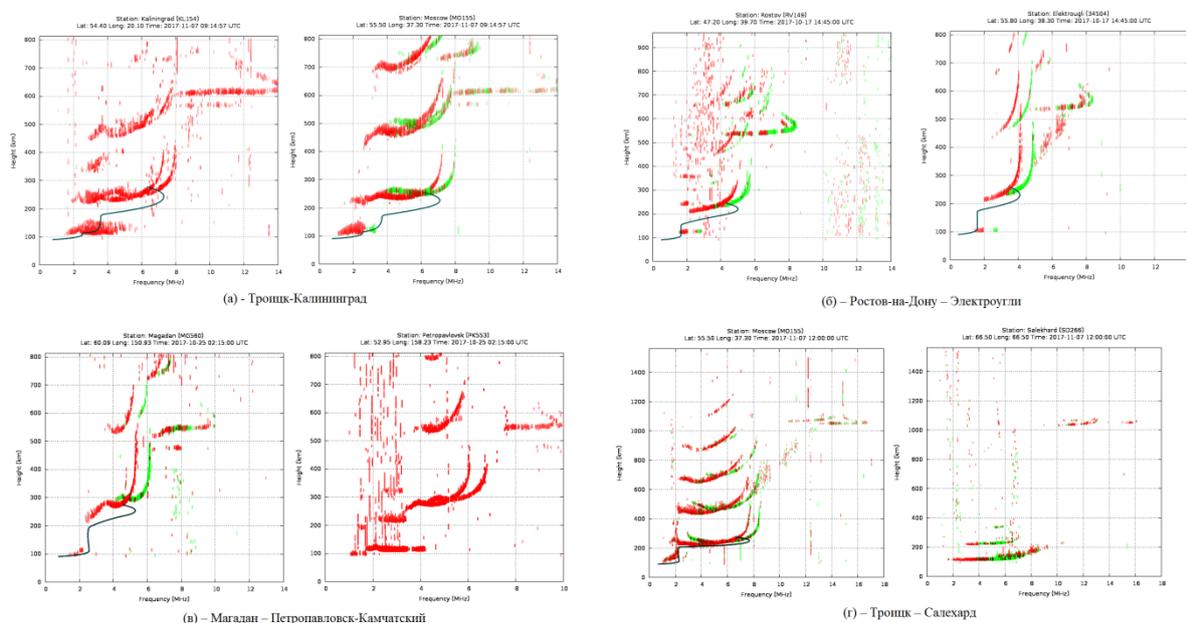


Рис. 7. Результаты эксперимента по наклонному зондированию ионосферы.

В 2018 году эксперименты продолжились в расширенном формате. В частности, проводились опыты по дистанционной поверке одного ионозонда другим, эталонным. А также проводились суточные прогоны на некоторых направлениях, что позволило оценить изменение высотно-частотной характеристики в течение суток.

Также практически на предельной дальности подтвержден взаимный прием сигнала на трассе Москва – Салехард (1972 км.). Сигнал принимается сильно ослабленным, поскольку излучение и прием производятся боковыми лепестками диаграммы направленности. Результаты представлены на рисунке 10.

Суточный прогон в режиме комплексного зондирования проведен на уже проверенной трассе Магадан – Петропавловск-Камчатский (рис. 8) [5]. Протяженность трассы – 910 км. Отмечено, что со спадом солнечной активности частоты, на которых происходит отражение от ионосферы, уменьшаются. При этом и высота отражающего слоя при НЗ также уменьшалась, что подтверждается результатами вертикального зондирования. Кроме того, в некоторых случаях, когда после захода Солнца вертикальное зондирование практически отсутствовало, следы наклонного зондирования еще некоторое время наблюдались (около двух часов). Активность передатчика на станции Магадан доказывается присутствием следов на ионограмме в Петропавловске-Камчатском.

Такой же эксперимент проведен на трассе Магадан – Хабаровск (рис. 9). Протяженность трассы – 1747 км – практически предельная для наклонного зондирования ионозондом такого типа. Также отмечено устойчивое наклонное зондирование в отсутствие вертикального. Однако при этом сигнал проходил только с переотражением от земной поверхности, и также явно видно снижение отражающего слоя.

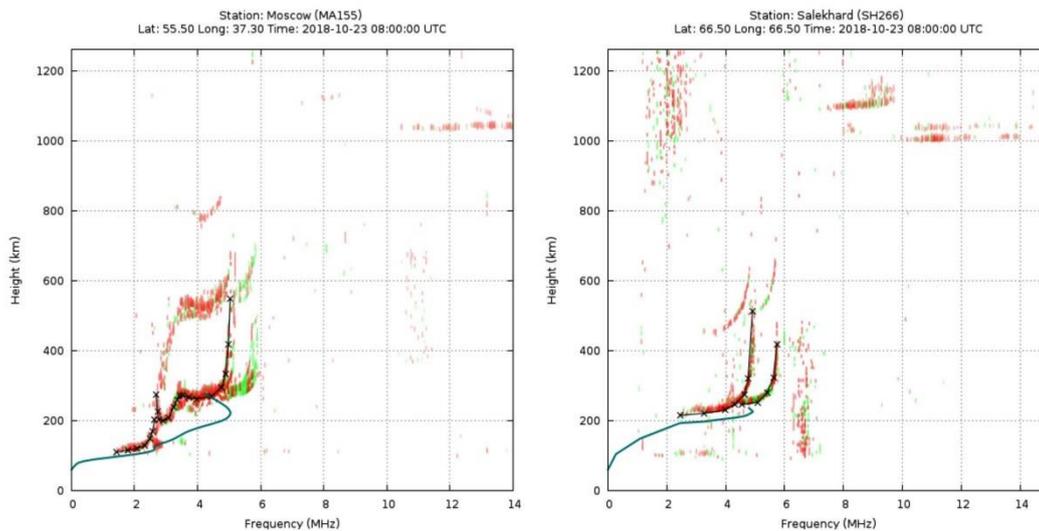


Рис. 10. Данные комплексного зондирования ионосферы, полученные ионозондами на ст. ИЗМИРАН-Троицк (слева) и ст. Салехард (справа) 23 октября 2018 г. 08:00 UTC.

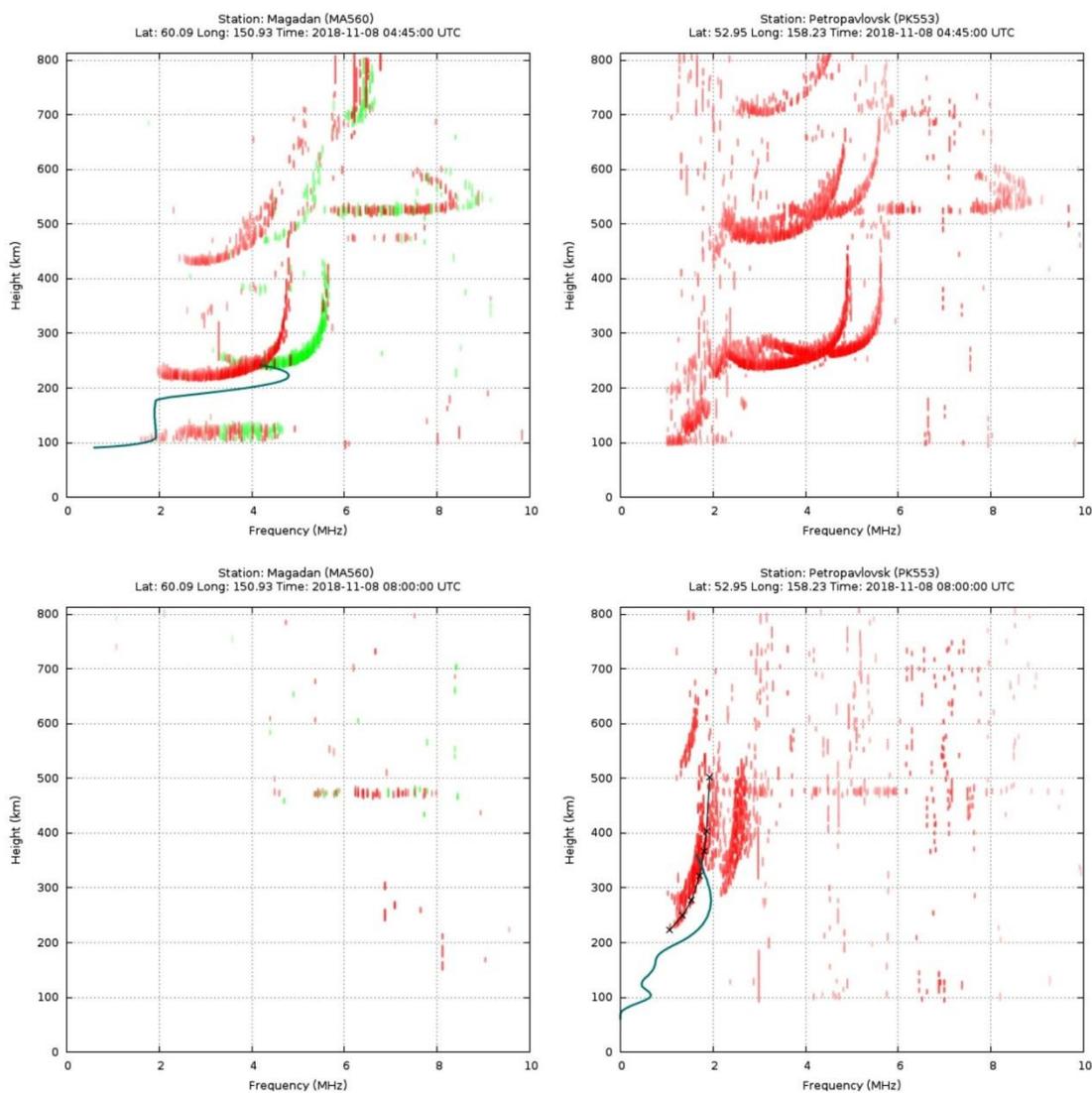


Рис. 8. Данные комплексного радиозондирования ионосферы, полученные ионозондами на ст. Магадан (слева) и ст. Петропавловск-Камчатский (справа) 8.11.2018 г.

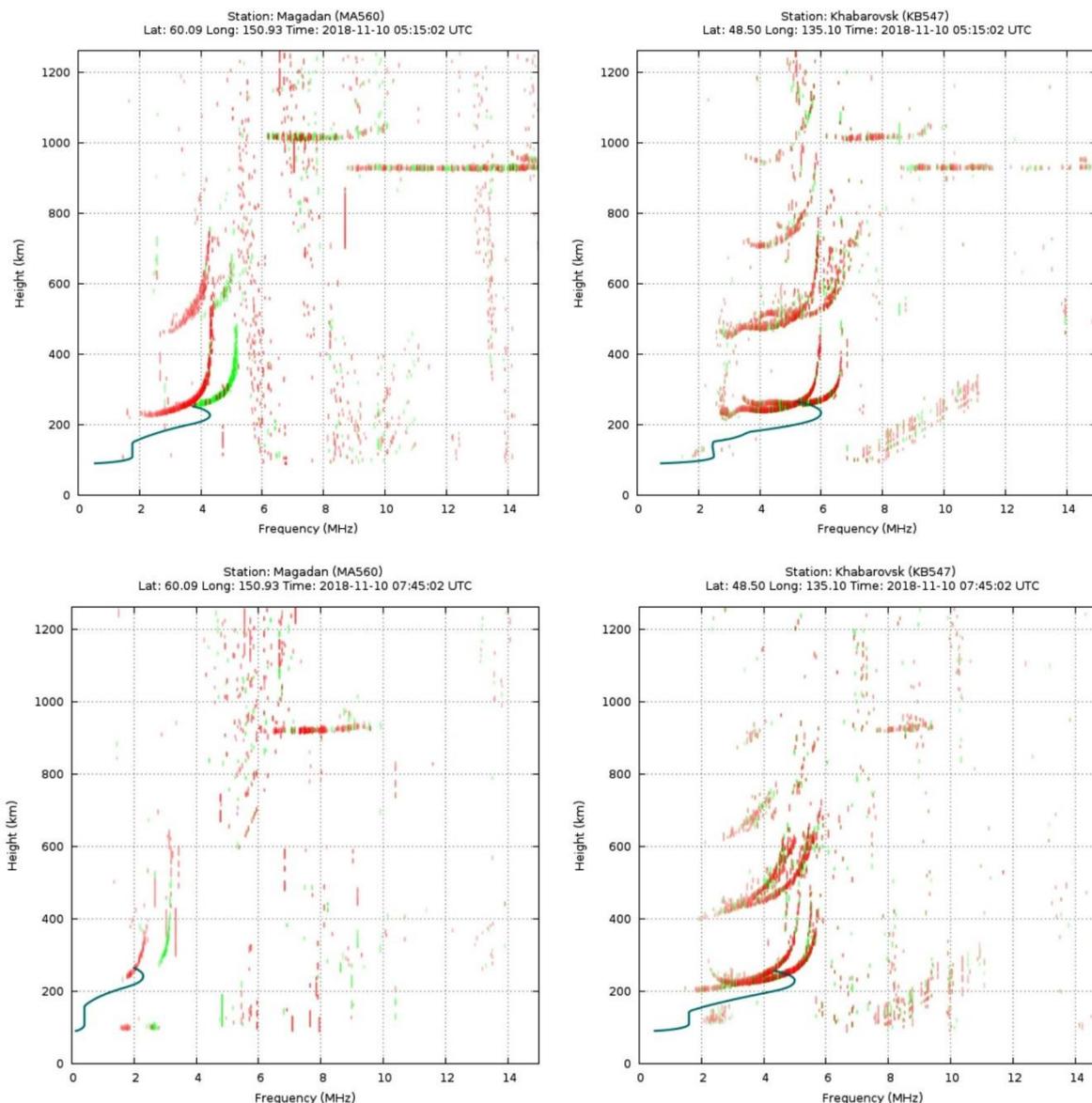


Рис. 9. Данные комплексного радиозондирования ионосферы, полученные ионозондами на ст. Магадан (слева) и ст. Хабаровск (справа) 10 ноября 2018 г.

Любопытный результат достигнут в европейском секторе на трассе Москва – Калининград. К слову, в московском регионе размещены сразу два ионозонда – в Троицке и в районе города Электроугли, на расстоянии 69 километров друг от друга. В итоге на ионограмму в Калининграде наложились следы сразу двух ионозондов (рис. 11).

При этом на ионограмме явно различаются эти следы, в зависимости от высоты. Поскольку ионозонд в Электроуглях хоть и ненамного, но дальше, то и следы НЗ выше, чем следы от Троицка.

Таким образом, новый этап эксперимента подтвердил возможность устойчиво осуществлять комплексное зондирование на сетевых ионозондах «Парус-А». При этом каких-либо существенных доработок не потребовалось.

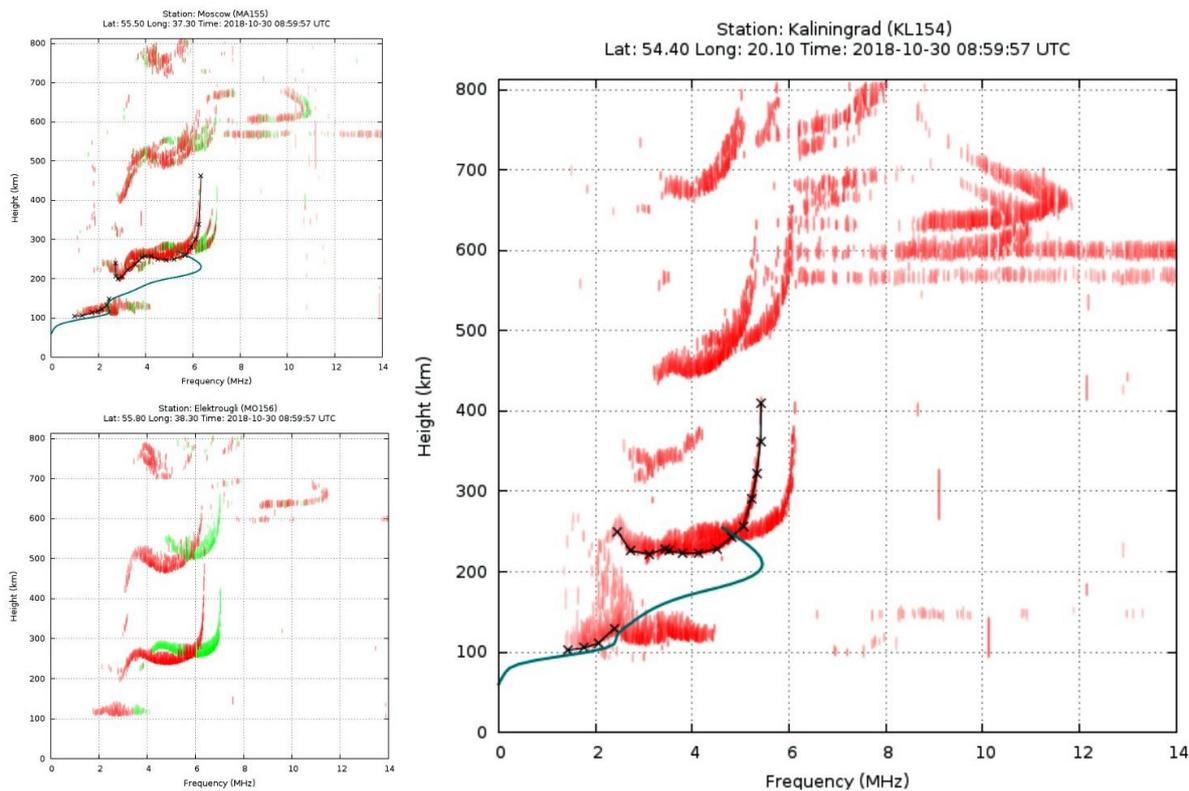


Рис. 11. Данные комплексного радиозондирования ионосферы, полученные ионозондами на ст. ИЗМИРАН-Калининград (справа, поляризационный прием), ст. ИЗМИРАН-Троицк (слева сверху) и ст. Электроугли (слева снизу) 30 октября 2018 г 08:59 UTC.

Методы определения параметров ионосферы

В качестве первичной оценки состояния ионосферы возможно использовать статистический метод, например, модель ионосферы IRI-2016 (International Reference of Ionosphere – международная справочная модель ионосферы) [6]. Эта система позволяет провести моделирование и узнать параметры ионосферы в конкретном месте и в конкретное время. Она является глобальной медианной моделью ионосферы (т.е. позволяет строить долгосрочные прогнозы в любой точке земного шара). У нее довольно высокая точность долгосрочного прогноза при сравнении с реально полученными данными вертикального зондирования.

Наиболее полную и легко интерпретируемую информацию о состоянии ниже максимума электронной концентрации ионосферы дают средства вертикального радиозондирования ионосферы (ВЗ) [7]. Основным преимуществом метода ВЗ является возможность получения профиля электронной концентрации нижней ионосферы ($N(h)$ – профиля) из непосредственных измерений с использованием модельных представлений только о ненаблюдаемой при ВЗ впадине электронной концентрации между областями E и F. Точность получения $N(h)$ -профиля из данных ВЗ проверена многолетними исследованиями и является в отсутствии прямых ракетных измерений эталонной. Недостатком метода ВЗ, который компенсируется установкой сети станций, является локальность метода, а оперативное представление данных в мировой сети Inthernet позволяет использовать их для решения большинства прикладных задач.

Метод наклонного радиозондирования ионосферы, суть которого состоит в пространственном разnose приемной и передающей систем ионозонда и синхронизации процессов излучения и приема, дает принципиальную возможность прямого экспериментального исследования как прохождения радиоволн на фиксированной дальности, так и возможность оценки состояния ионосферы в области средней точки

радиотрассы при односкачковом распространении. Если изменение частоты происходит в достаточно широком диапазоне, то результатом является ионограмма наклонного радиозондирования ионосферы, которая отражает частотную зависимость группового запаздывания сигналов, прошедших различными путями в ионосфере, в точке приема, т.е. модовую структуру волнового поля.

Некоторой разновидностью метода НЗ можно считать случай совмещения пунктов излучения и приема – возвратно-наклонное радиозондирование ионосферы (ВНЗ) [8]. Этот метод нашел широкое применение в РЛС загоризонтного обнаружения. Так, одно из возможных решений задачи согласования параметров РЛС (таких, как рабочая частота) с характеристиками трассы распространения (амплитудно-частотными и дальностно-частотными) заключается во введении в состав РЛС специального тракта определения оптимального поддиапазона рабочих частот. Назначение этого тракта заключается в выборе поддиапазона частот, в котором затухание на трассе распространения минимально, с целью оптимизации работы тракта обнаружения полезного сигнала. Конструктивно данный тракт может представлять собой самостоятельную РЛС, входящую в состав основной РЛС, со своим возбудителем и отдельными приемными устройствами. Как, например, станция ВНЗ «Круг», входившая в ЗГ РЛС «Дуга». Также этот тракт реализуется в режиме работы самой РЛС на тех же аппаратных средствах, что и обнаружение, этот режим осуществляет возвратно-наклонное зондирование и уточняет параметры работы РЛС.

Заключение

Эксперимент подтвердил возможность наклонного зондирования ионосферы на трассах до 2000 км одновременно с вертикальным зондированием на ионозонде «Парус-А». Кроме того, суточный прогон ионозондов в режиме комплексного зондирования показал, что такой режим не является помехой для отделения следов вертикального зондирования от наклонного с целью корректировки.

Литература

1. Руководство по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям, Москва ФГБУ «ИПГ» 2012, 270 с.
2. Власов Ю.М., Глинкин И.А., Литвинов С.В. Применение наклонного зондирования ионосферы для увеличения точностных характеристик ЗГ РЛС // Вопросы Радиоэлектроники №3 2018 г., С.11-18.
3. Литвинов С.В., Паньшин Е.А. Результаты работ по расширению функциональных возможностей ионозонда «Парус-А» ионосферной сети ФГБУ «ИПГ // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской научной конференции. –Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2018. С 381 - 388.
4. Анохина Н.П., Атряхин В.А., Литвинов С.В., Ребриков А.В. Метод уменьшения ошибок определения координат воздушной цели в загоризонтном радиолокаторе // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны: науч. журн.; ЯВВУ ПВО. – Ярославль, 2018. – № 2. – с. 15-22.
5. Литвинов С.В., Сидоров Р.В. Применение фазированной антенной решетки для наклонного зондирования ионосферы // IV Всероссийская научно-техническая конференция «РТИ Системы ВКО–2016»: труды конференции. – Москва: Изд. МГТУ им Н.Э.Баумана, 2017. С.738-748.
6. Кузьмин А.В., Канаев А.С. Средства вертикального радиозондирования ионосферы // Гелиофизические исследования Выпуск 2, С.72–82, 2012.

7. Акимов В.Ф., Калинин Ю.К. Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов; под ред. С. Ф. Боева ; ОАО «РТИ», ОАО «НПК «НИИДАР». - Москва : Техносфера, 2017. - 491 с.
8. Гивишвили Г.В., Крашенинников И.В., Лещенко Л.Н., Власов Ю.М., Кузьмин А.В. Ионозонд «ПАРУС-А»: функциональные возможности и перспективы // Гелиофизические Исследования выпуск 4, 68–74, 2013.