

УДК 551.510.535

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ СО СПУТНИКОВ НА НИЗКОЙ КРУГОВОЙ ОРБИТЕ

К.Г. Цыбуля, Н.П. Данилкин

Поступила в редакцию 19.01.2016 г.

В статье рассматриваются возможности и варианты оптимизации будущего космического комплекса радиозондирования ионосферы с круговой солнечно-синхронной орбиты с точки зрения мониторинга околоземного космического пространства над арктической областью. Представлены критерии эффективности использования космических систем для внешнего радиозондирования. В результате проведенного моделирования подобраны оптимальные варианты орбит с точки зрения освещенности Солнцем, получения максимально информативных ионограмм и пересылки информации в реальном режиме времени.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** СПУТНИКОВОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ ИОНОСФЕРЫ

### ВВЕДЕНИЕ

Существующая система ионосферного мониторинга Российской Федерации состоит из 18 станций, расположенных по всей территории России. Получаемые на этих станциях данные используются для корректировки ионосферных моделей, расчета коротковолновых радиотрасс, прогноза ионосферной активности и других целей. Область арктической полярной шапки, лежащая над российской территорией и непосредственно примыкающая к ней, играет принципиальную роль. Но именно в этой области протекают сложные, малоизученные, трудно прогнозируемые процессы. Наземные станции позволяют определять плотность ионосферы лишь до высоты ионосферного максимума и даже получение этих данных под арктической полярной шапкой сильно затруднено, так как большая ее часть находится над Северным Ледовитым океаном или над территорией зарубежных государств.

С целью обеспечения регулярной диагностики параметров верхней атмосферы, ионосферы и околоземного космического пространства в настоящее время разрабатывается космический спутниковый комплекс, который позволит вывести геофизическую службу России на современный уровень. Для мониторинга ионосферы спутники комплекса будут оснащены ионозондами внешнего зондирования. Использование методов зондирования сверху позволит обеспечить полноту мониторинга ионосферы, то есть получить недостающие данные и улучшить как понимание физических процессов, так и возможности оперативного и надежного прогноза геофизической обстановки. Также расширяются возможности анализа антропогенного воздействия на верхние слои атмосферы, включая активные воздействия.

Ионозонды внешнего зондирования ионосферы имеют более чем полувековую историю, начиная с американо-канадского проекта «Алуэтт» (1962–1972 гг.). В Советском Союзе успешно эксплуатировались ионозонды на ИСЗ «Интеркосмос-19», «Космос-1809», а также на орбитальной станции «Мир», хотя и летавшей на высотах 330–390 км, но большую часть времени проводившей внешнее радиозондирование, находясь на высотах выше максимума области F. Технология получения внешних ионограмм хорошо отработана. Современные технологии, как в области аппаратного, так и программного обеспечения позволяют вывести методику внешнего зондирования на новый качественный уровень. Кроме того, спутниковое зондирование обеспечивает не только мониторинг арктической области, но и всей планеты. Современные отечественные ионозонды наземного базирования «Парус-А» оснащены аппаратурой для совместной работы с бортовым ионозондом в режимах прямого и обратного трансionoсферного радиозондирования.

Обработку, анализ и использование данных внешнего зондирования можно также проводить и без наличия ионозондов наземного базирования типа «Парус-А». Все перечисленные выше бортовые

отечественные ионозонды имели специальный радиоканал на частоте 137 МГц для передачи на землю оперативной информации в режиме реального времени, т.е. без какой-либо задержки. Этим каналом обеспечен также и подготавливаемый в настоящее время бортовой ионозонд «Лаэрт». В период проведения экспериментов на спутниках «Интеркосмос-19», «Космос-1809», и космической станции «Мир» использовались специально созданные приемные установки на частоту 137 МГц с полноповоротными антеннами для приема оперативной информации по внешнему зондированию и управлению приемом сигналов трансионосферного зондирования. Так для работы с ионозондом «Космос-1809» было создано 15 таких приемных станций, которые работали на географических широтах от Кубы до Северного полюса. Измерения в Арктике, в том числе и на Северном полюсе [1], производились экспедицией ИПГ с борта ледокола, где регистрировались ионограммы на всех витках спутника «Космос-1809». Иными словами, в период этого похода был получен опыт практически непрерывного оперативного мониторинга арктической ионосферы. Для синхронизации работы бортовых ионозондов с ионозондами наземного базирования и приемными станциями применялась специальная схема синхронизации, осуществляемая специальной последовательностью импульсов на частоте 137 МГц.

Как планируется, будущая российская космическая система наблюдений должна иметь в своем составе пять малых космических аппаратов. Четыре из них имеют на борту ионозонды для внешнего зондирования ионосферы Земли, а пятый, более крупный аппарат, снабжен аппаратурой для детальных измерений параметров околоземного космического пространства. Ионозонд «Лаэрт» в этой системе оснащен специальным приемником GPS сигналов, что позволит осуществлять синхронизацию ионозондов бортового и наземного базирования без специальной радиолинии. Полный комплекс целевой аппаратуры включает не только ионозонд, но и солнечно-магнитосферный и атмосферный комплексы наблюдений. Оптимизация возможностей такого орбитального комплекса необходима для обеспечения непрерывного или почти непрерывного мониторинга геофизической обстановки над Арктикой.

## 1. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ИОНОСФЕРНОГО МОНИТОРИНГА

Эффективность системы мониторинга следует оценивать по следующим критериям:

1. Охват арктической зоны мониторинговой системой
2. Качество данных, возможность получить из них требуемую практически важную информацию
3. Оперативность доставки данных

Из всех ионограмм, производимых каждым спутником за сутки, примерно 12% будут получены к северу от северного полярного круга. Имея комплекс из четырех аппаратов, мы можем обеспечить присутствие, по крайней мере, одного из них над северной полярной шапкой примерно половину времени. Орбитальные периоды для круговой орбиты высотой 600–900 км составляют 1.6–1.7 ч. Если, например, ионосферная буря продолжается ~3 ч, то за это период произойдет, в среднем, около 6 пролетов спутников комплекса над арктической зоной. Это позволит отследить развитие бури во всех фазах, причем, поскольку наблюдения производятся из двух разных плоскостей, под разными углами к оси день-ночь, параллельной хвосту магнитосферы. Охват арктической зоны с точки зрения получения данных от секторов с разной долготой и освещенностью разбирается далее в статье (раздел 2).

Спутниковый ионозонд, изготовленный с применением современных технологий, позволяет получать высококачественные ионограммы каждые 10 с при диапазоне частот 0.1–20 МГц, частотном разрешении 20 кГц и объеме несжатой ионограммы около 160 Кбайт. Максимальная действующая высота составляет 2000 км, а разрешение по высоте — 10 км. Для регистрации интенсивности отраженного радиозаха предусматривается 255 ступеней. Суточный объем информации от одного такого ионозонда составляет около 1.5 Гбайт. Производя зондирование с высоты до 1000 км с помощью ионозонда с такими характеристиками, можно получить более высокое качество данных, чем у большинства современных ионозондов. Для арктической области особенно важно использование простого гладкого зондирующего радиоимпульса, поскольку выраженные плазменные неоднородности полярной шапки сильно осложняют детектирование отраженного фазомодулированного сигнала.

Оценивая радиус первой зоны Френеля как

$$r = \sqrt{\frac{\lambda H}{2}},$$

где  $\lambda$  — длина волны, а  $H$  — высота над точкой отражения, получаем, что даже для низких частот (0.5 — 1 МГц) и характерных расстояния до точки отражения 500 км размер зоны  $r$  составляет менее 10 км, то есть достаточно мал, чтобы избежать сильного рассеяния от почти всех пространственных неоднородностей плазмы.

Доставка данных обеспечивается наземным комплексом приема, обработки и распространения спутниковой информации (НКПОР), пункты приема которого расположены в Москве, Новосибирске и Хабаровске. Если оперативность доставки информации через НКПОР недостаточно велика, можно использовать сброс информации ионозонда в режиме реального времени на приемники, размещенные на арктических станциях Росгидромета (раздел 4).

Использование синхронизации счетчика времени с навигационной системой GPS или ГЛОНАСС позволяет принимать на спутнике сигналы наземных ионозондов и, наоборот, использовать наземные ионозонды для приема зондирующих импульсов спутника (прямые и обратные трансionoграммы [2]). Для регулярного получения трансionoграмм, однако, надо оснастить совместимыми ионозондами арктические станции Росгидромета (Мурманск, Амдерма, Салехард, Диксон, Певек).

## 2. ВЫБОР ОРБИТЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ НАД ПОЛЯРНОЙ ШАПКОЙ ЗЕМЛИ

Для охвата арктической области орбиты спутников должны быть близкими к полярной. Желательно также выбрать наиболее благоприятные орбиты с точки зрения освещенности (угла Солнца над горизонтом). Из-за орбитального движения Земли и прецессии орбиты спутника, вызываемой сплюснутостью Земли к экватору, ориентация плоскости орбиты по отношению к Солнцу изменяется. Однако можно подобрать наклонение орбиты таким образом, чтобы эти два фактора компенсировали друг друга. Тогда ориентация орбиты по отношению к Солнцу будет оставаться почти постоянной в течение всего времени существования системы (солнечно-синхронная орбита). Это дает возможность производить радиозондирование и другие ионосферные наблюдения в условиях примерно одинаковой освещенности (местного времени). В полярной области, однако, положение Солнца над горизонтом, в том числе моменты пересечения Солнцем лимба Земли и высота Солнца над горизонтом, будут сильно зависеть от времени года.

Наклонение орбиты должно быть подобрано таким образом, чтобы сплюснутость Земли к экватору вызывала прецессию плоскости орбиты на  $360^\circ$  в год. Скорость прецессии орбиты зависит от ее наклонения, как

$$\Omega = -\frac{3\pi R_E^2}{a^2(1-e^2)^2 T} J_2 \cos i,$$

где:

$\Omega$  — угловая скорость прецессии плоскости орбиты спутника;

$R_E$  — экваториальный радиус Земли (6 138 км);

$a$  — большая полуось орбиты;

$e$  — эксцентриситет орбиты;

$T$  — период обращения спутника;

$J_2$  — второй динамический форм-фактор Земли ( $1.08 \cdot 10^{-3}$ );

$i$  — наклонение орбиты.

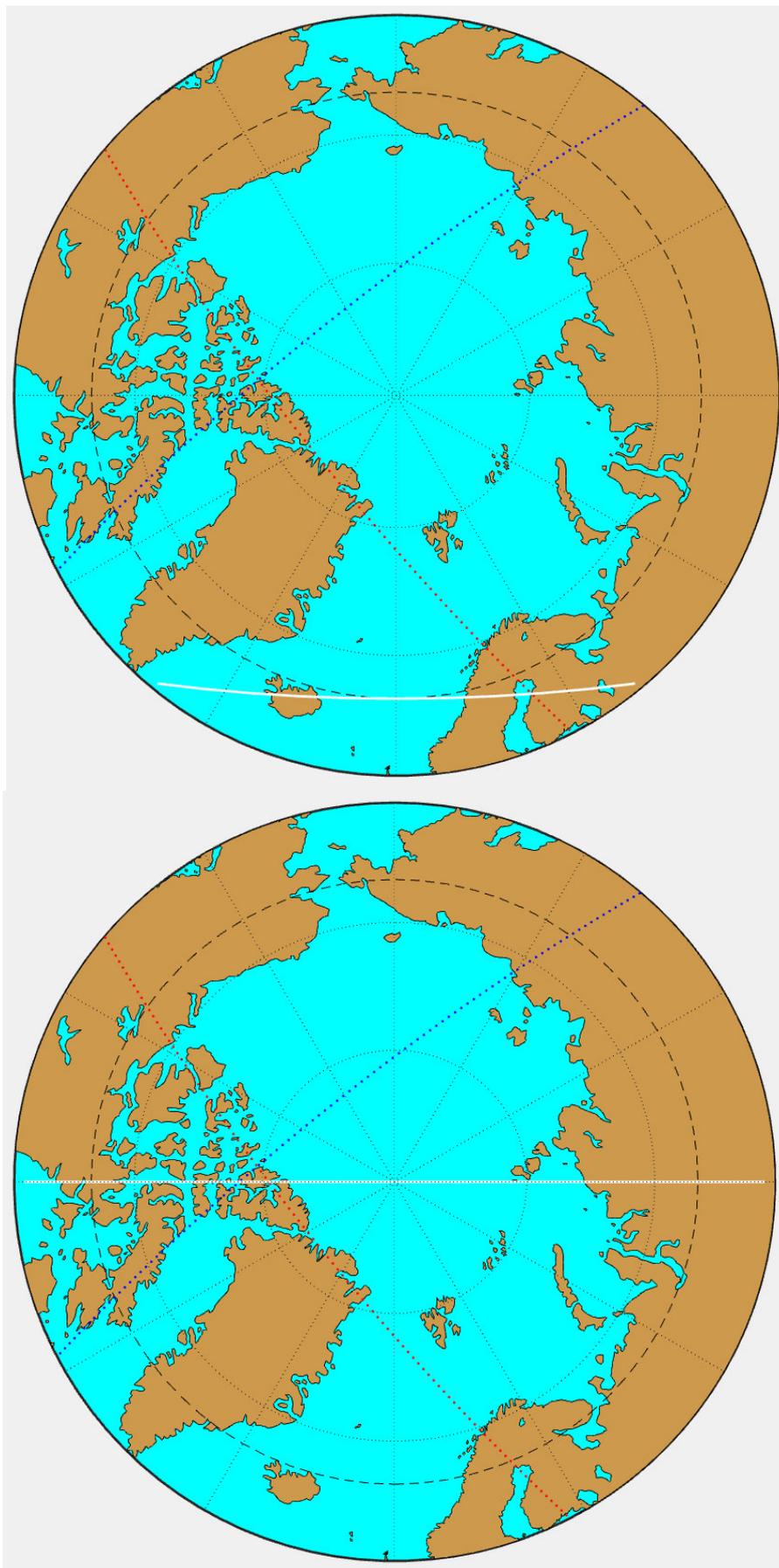


Рис. 1. Траектории спутников над арктической шапкой во время солнцестояния (сверху) и равноденствия (снизу).

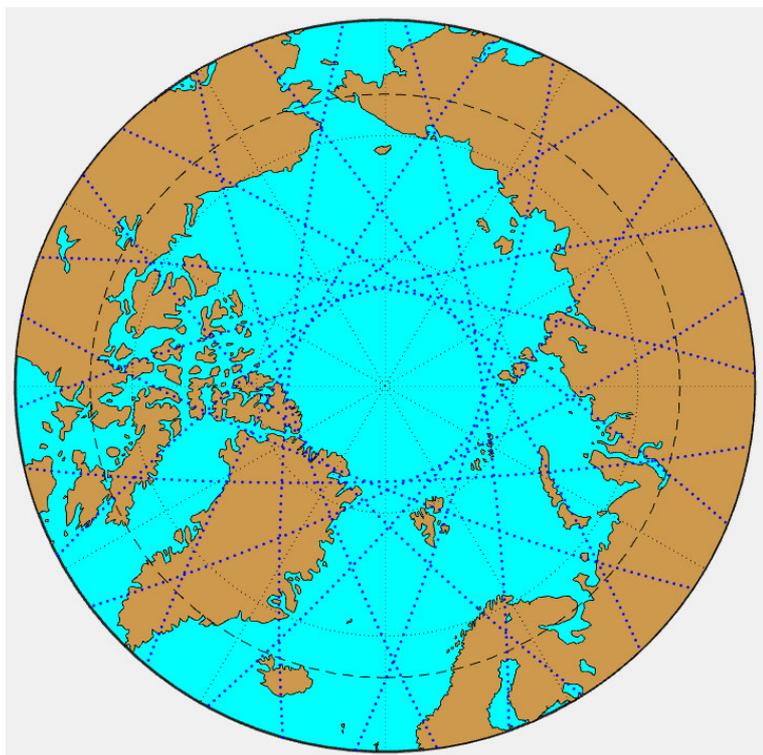


Рис. 2. Точки снятия ионограмм (через каждые 10 с) за одни сутки. Высота орбиты 600 км.

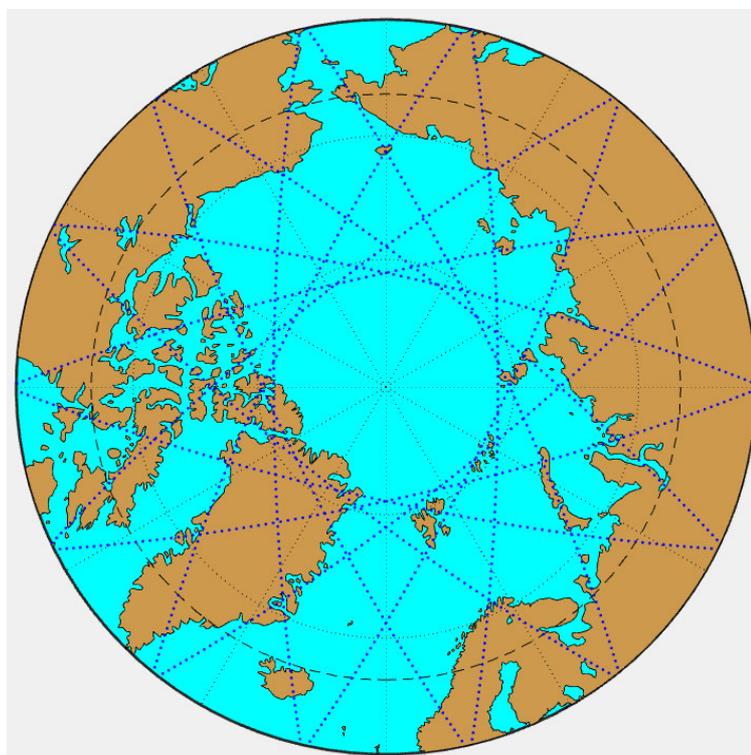


Рис. 3. Точки снятия ионограмм (через каждые 10 с) за одни сутки. Высота орбиты 900 км.

Знак минус означает, что направление, в котором происходит прецессия противоположно направлению вращения спутника, то есть для поворота плоскости орбиты вслед за Солнцем наклонение к экватору должно быть больше  $90^\circ$  (ретроградная орбита, см. [3]). Конкретная величина наклона зависит, как видно, так же и от радиуса круговой орбиты, причем достаточно сильно (обратно пропорционально  $a^{3.5}$  с учетом зависимости от периода  $T$ ). Более высокие орбиты требуют больших наклонений, от  $97.5^\circ$  для орбиты 600 км до  $98.7^\circ$  для 900 км.

Для более полного охвата арктической зоны, так же, как и остальной поверхности Земли, желательно иметь орбитальную систему из нескольких спутников. Как основной вариант рассматривался комплекс из четырех спутников, обращающихся в двух перпендикулярных плоскостях, по два аппарата на каждой орбите. Спутники на каждой из орбит разведены на  $180^\circ$ , то есть находятся в противоположных точках орбиты.

Следующим важным вопросом является выбор ориентации орбит по отношению к Солнцу. Рассматривались два варианта [4]:

1. Одна из плоскостей находится, возможно, более близко к терминатору, долгота ее восходящего узла на  $90^\circ$  меньше, чем прямое восхождение Солнца. Характерное местное время для восходящего и нисходящего узлов составляет 6 ч и 18 ч. Вторая орбита лежит в полуночно-полуденной плоскости, то есть долгота восходящего узла равна прямому восхождению Солнца (местное время – 12 ч и 0 ч).

2. Долгота восходящего узла первой орбиты на  $45^\circ$  больше, а второй — на  $45^\circ$  меньше Солнца. Характерное местное время составляет 3 ч и 15 ч для узлов первой орбиты, а для узлов второй — 9 ч и 21 ч.

Главный недостаток первого варианта состоит в том, что наблюдения в области терминатора будут сильно варьироваться из-за резких горизонтальных градиентов ионосферной плотности в этой области. Второй вариант имеет некоторое преимущество в экваториальной области, поскольку в 15 ч местного времени достигает максимального развития экваториальная аномалия. Поэтому второй вариант рассматривается как основной.

Приведем иллюстрации орбит для второго варианта во время солнцестояния и равноденствия (рис. 1). Черным пунктиром отмечен полярный круг. Красный и синий пунктир соответствует траекториям спутников в двух плоскостях. Терминатор отмечен белой линией. В случае летнего солнцестояния территория сверху от терминатора предполагается освещенной, а в случае зимнего — темной.

Следующим важнейшим параметром является высота орбиты. С точки зрения получения ионограмм внешнего зондирования высота орбиты не может быть меньше 600 км. Учитывая, что максимум электронной плотности в арктической области может лежать на высотах до 450 и даже 500 км, меньшая высота приводит к получению данных об электронной плотности в недостаточно большом диапазоне высот. В качестве верхнего предела можно принять высоту 900 км — критическая частота на таких высотах над полярной областью часто ниже 1 МГц, то есть ионозонд с таким нижним пределом частот не сможет получить отражения от плазменной среды в окрестности спутника. Кроме того, для поддержания солнечной синхронности для более высокой орбиты приходится увеличивать наклонение, что увеличивает размер «мертвой зоны» в центре.

Объем получаемых данных можно оценить по рисункам 2 и 3, где приведены результаты моделирования орбитального движения спутника по солнечно-синхронной орбите за одни сутки. Каждая точка соответствует месту радиозондирования ионосферы при условии, что ионограммы снимаются каждые 10 с. Разница в объеме данных и охвате арктической области невелика, хотя для солнечно-синхронной орбиты с высотой 900 км приходится выбрать большее наклонение, что расширяет круговую зону около полюса, оставленную без покрытия. Кроме того, пространственное разрешение для 900-километровой орбиты несколько выше за счет несколько меньшей скорости движения спутника.

### **3. ВЫБОР ОРБИТЫ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ОСВЕЩЕННОСТИ АТМОСФЕРЫ СОЛНЦЕМ**

Поскольку главным фактором, определяющим условия ионизации верхней атмосферы, является солнечное излучение, рассмотрим, каким образом выбор орбиты влияет на количество наблюдений, произведенных при различных зенитных углах Солнца.

Условия освещения, при которых снимаются ионограммы, можно оценить по рисункам 4–7 для разных вариантов выбора плоскостей орбит. Рассмотрим сначала период летнего солнцестояния, то есть полтора месяца до и полтора месяца после самого момента стояния (в период зимнего солнцестояния северная полярная шапка не освещена). Траектория спутника, движущегося по солнечно-синхронной орбите в плоскости 06–18 ч, лежит при пересечении арктической шапки почти параллельно линии терминатора, таким образом, зенитный угол Солнца изменяется в очень узких пределах от 59° до 68°.

Для спутника, находящегося в перпендикулярной плоскости наблюдается противоположная картина — Солнце поднимается по небосводу, проходя всевозможные для полярной области углы.

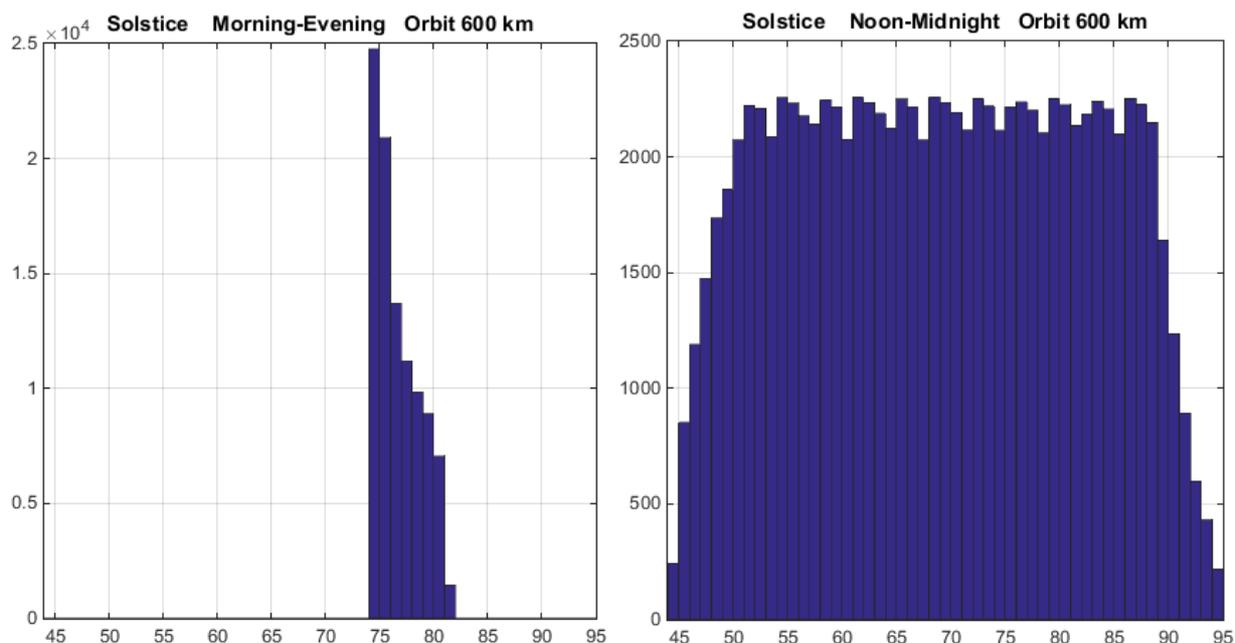


Рис. 4. Гистограммы зенитных углов Солнца за трехмесячный период около летнего солнцестояния для солнечно-синхронных орбит 06–18 ч и 00–12 ч.

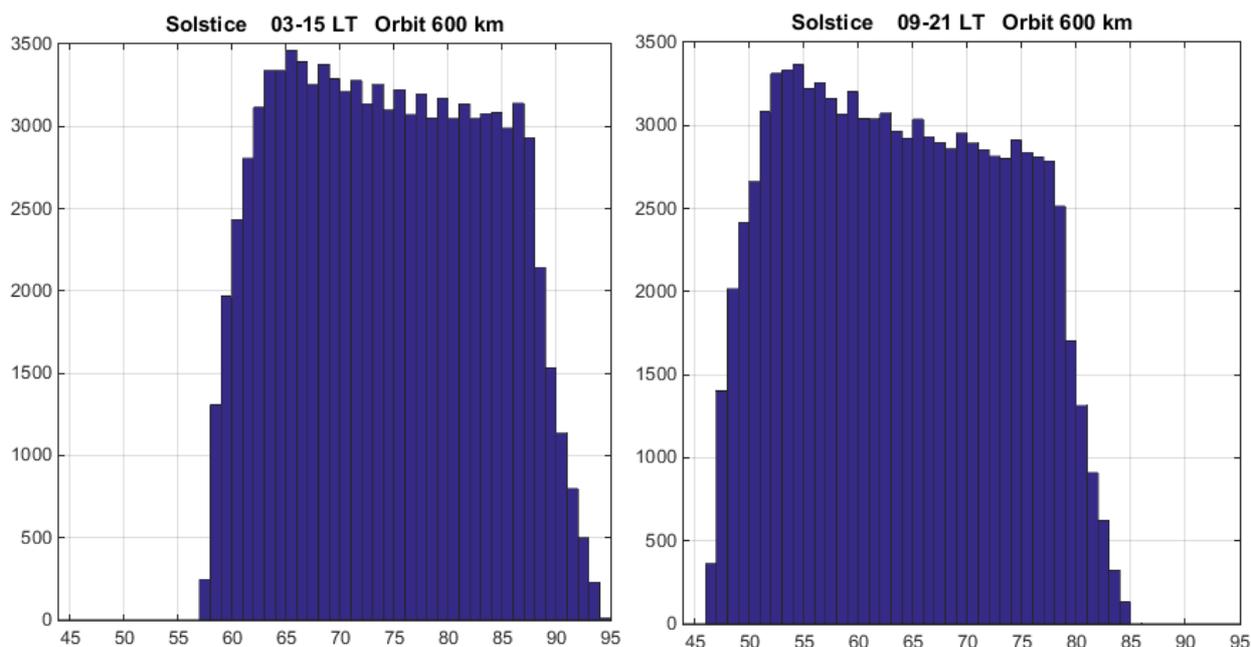


Рис. 5. Гистограммы зенитных углов Солнца за трехмесячный период около летнего солнцестояния для солнечно-синхронных орбит 03–15 ч и 09–21 ч.

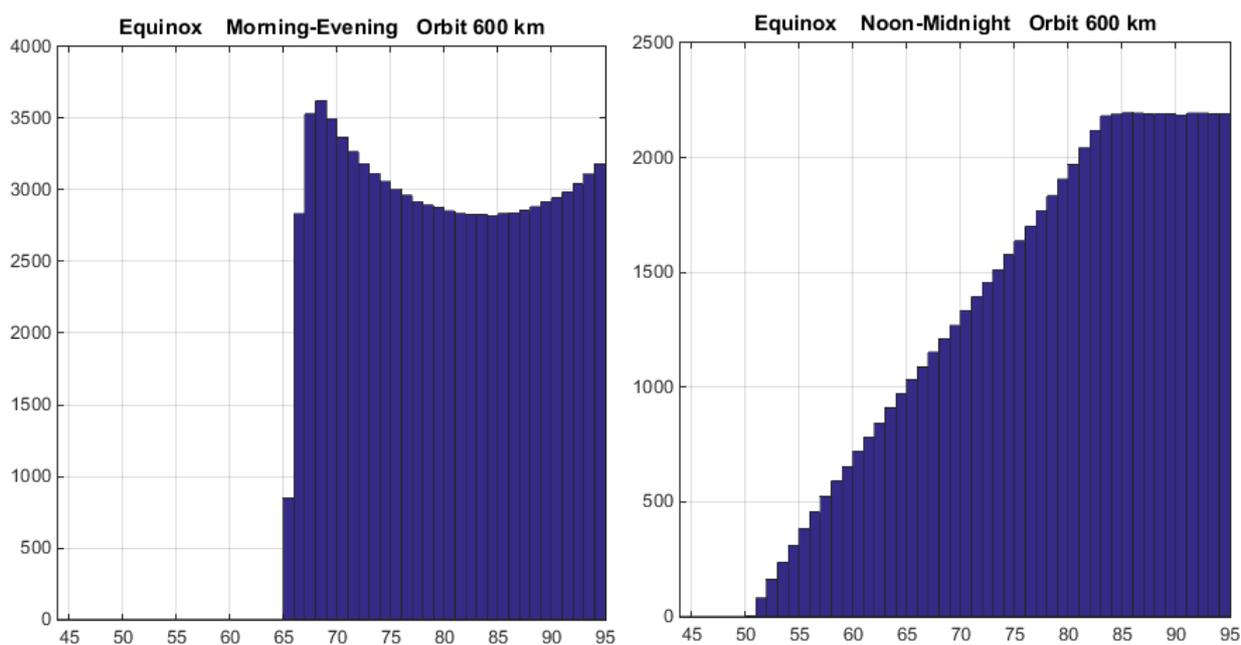


Рис. 6. Гистограммы зенитных углов Солнца за трехмесячный период около равноденствия для солнечно-синхронных орбит 06–18 ч и 00–12 ч.

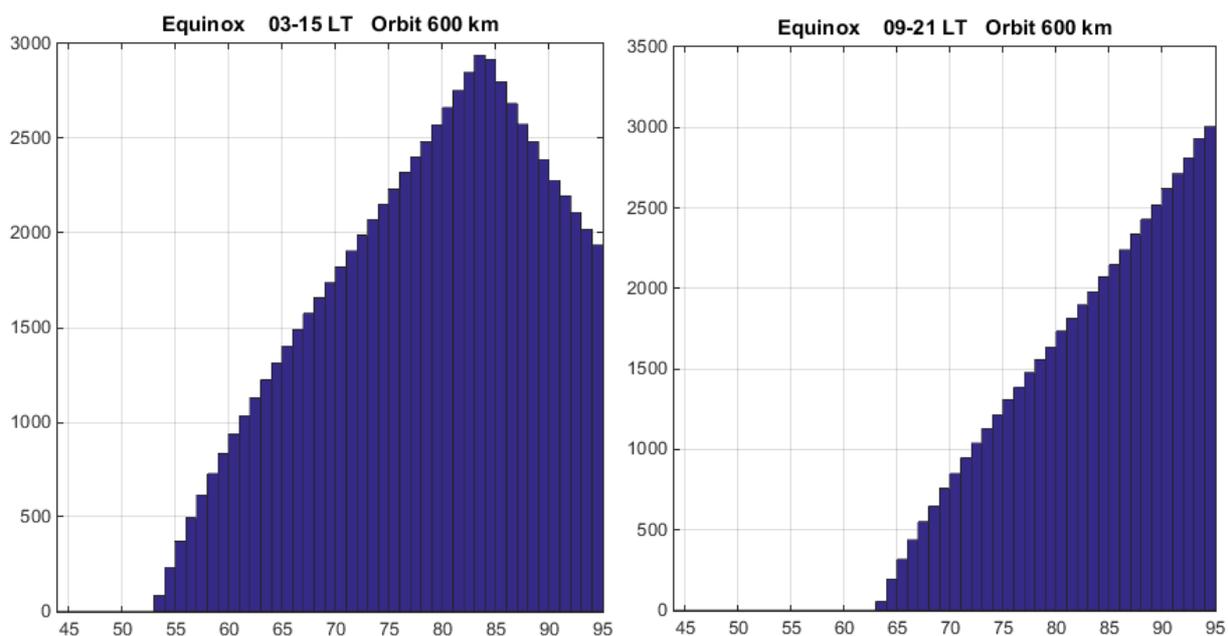


Рис. 7. Гистограммы зенитных углов Солнца за трехмесячный период около равноденствия для солнечно-синхронных орбит 03–15 ч и 09–21 ч.

Для орбитальной конфигурации в плоскостях (03–15 ч и 09–21 ч) распределения зенитных углов мало различаются, хотя сами распределения гораздо шире, то есть даже единственный спутник дает достаточно широкий охват зенитных углов.

Аналогичные распределения можно построить и для периода равноденствия.

Как видно из рисунков 6 и 7 орбита в плоскости терминатора дает более узкий диапазон условий освещенности, как этого и следовало ожидать.

#### 4. ПРИЕМ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ И ТРАНСИОНОСФЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

Для использования ионосферных данных важную роль играет оперативность их доставки. Однако, учитывая ограниченное количество телеметрических станций НКПОР (Москва, Новосибирск, Хабаровск), от момента измерения до момента получения информации в оперативном центре может пройти до 2 часов, а за этот период ионосферные данные устареют. Чтобы уменьшить задержку планируется передавать данные ионосферных измерений сразу же после их получения или одновременно с их получением по специальному радиоканалу реального времени на частоте 137 МГц аналогично тому, как это было осуществлено на борту ледокола для мониторинга арктического региона (рис.8, 9).

Прием этой оперативной информации может быть осуществлен на отечественных ионозондах «Парус-А», которые снабжены приемниками GPS-сигналов для синхронизации работы ионозондов наземного базирования с ионозондом «Лаэрт». Соответствующие параметры обоих ионозондов обеспечивают как прием ионограмм внешнего зондирования, так и прием сигналов прямого и обратного трансionoсферного зондирования [5, 6].



Рис. 8. Полноповоротная антенна, укрепленная на верхней палубе атомного ледокола «Сибирь», с помощью которой был осуществлен прием ионограмм внешнего и трансionoсферного радиозондирования, полученных на спутнике «Космос-1809». Несмотря на условия жесткой вибрации во время прохождения ледокола по тяжелым паковым льдам Северного ледовитого океана, не было потеряно ни одного сеанса ионосферного зондирования. В особо тяжелых случаях вибраций антенна укреплялась, как видно на фото, специальными тросами. Снимок сделан на Северном полюсе.

На рисунке 10 представлен пример циклограммы работы наземного и бортового ионозондов, таким образом, чтобы в одном сеансе получать одновременно ионограммы как в режиме прямого, так и в режиме обратного трансionoсферного зондирования, причем во втором случае в адаптированном виде.

Из циклограммы хорошо видно, что импульс передатчика бортового ионозонда — несмотря на вторую задержку в 3 мс — вполне помещается в диапазоне открытого окна приемника «Паруса-А» (синий сигнал). Меняя местами шкалы задержек уже на наземном ионозонде можно получить трансionoграмму в адаптированном виде для классической ситуации ВЗ, как показано в нижней части рисунка. То есть, управляя задержкой на наземном ионозонде, можно получать трансionoграмму на стандартном бланке ионограмм внешнего зондирования, внешней или нижней частей ионосферы Земли.

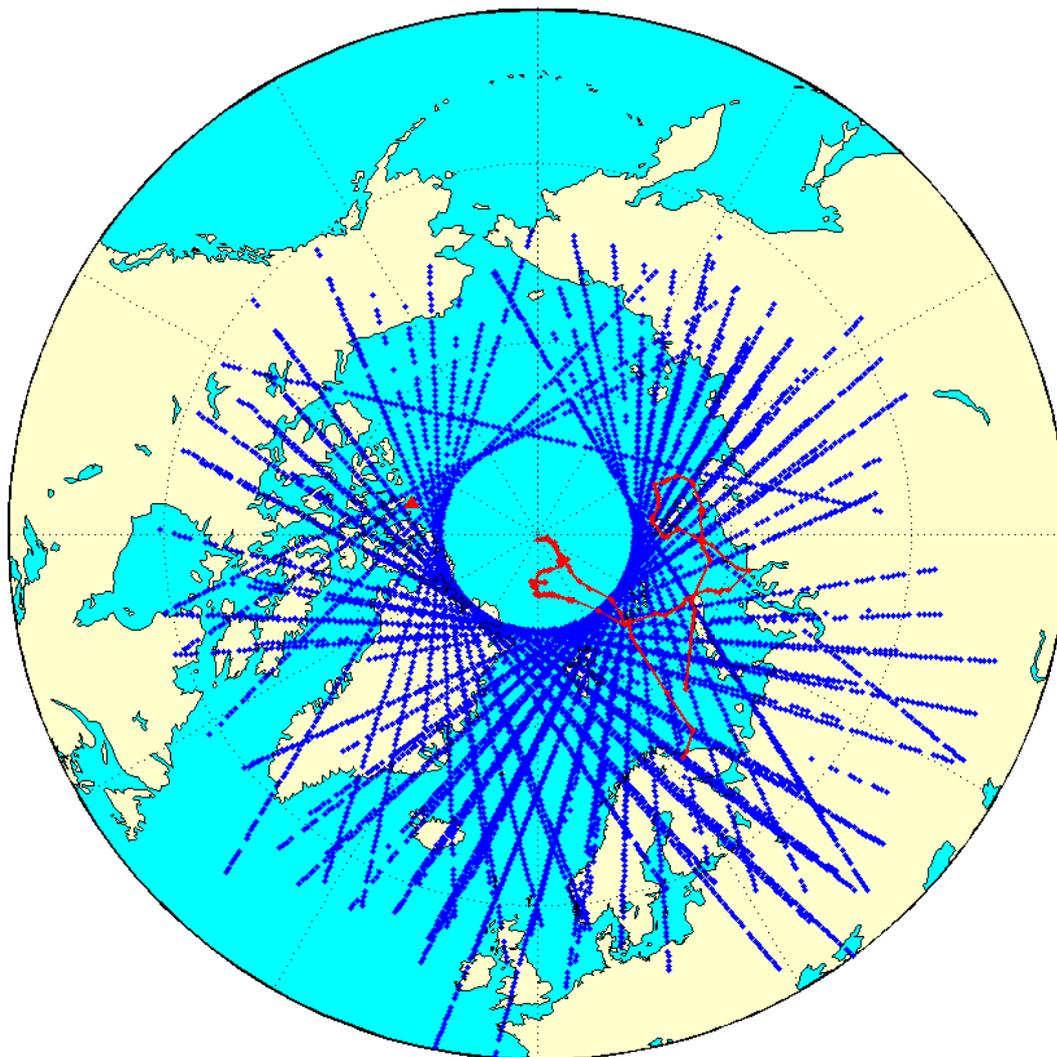


Рис. 9. Путь ледокола «Сибирь» (красная линия) и траектории пролетов спутника «Космос-1809» во время сеансов связи (синие линии).

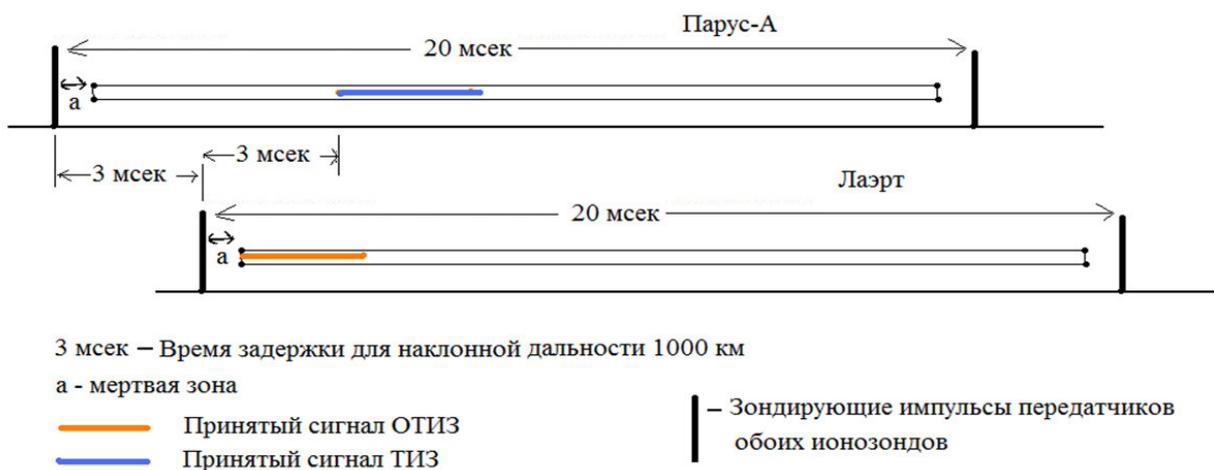


Рис. 10. Циклограмма приема сигналов прямого и обратного трансйонсферного зондирования для одной частоты

Приведенная на рис. 10 циклограмма убедительно показывает, что окон открытости при реальных данных бортовых и наземных ионозондах вполне достаточно. Конкретно, циклограмма на Рис. 10 построена на основе следующих данных:

Наклонное расстояние между спутником и наземной станцией — 1000 км,

Продолжительность импульса обоих передатчиков — 100 мкс,

Мертвая зона (время между концом импульса передатчика и моментом открытия приемника) 60 мкс или ~20 км действующей высоты,

Время между импульсами передатчиков — 20 мс

Длительность времени открытия окон на Парусе-А — до конца временного промежутка 20 мкс.

Под адаптированным представлением данных комплексного зондирования понимается принудительная локализация следов трансionoграммы в диапазон действующих высот следов обычной ионограммы вертикального зондирования за счет введения регулируемой временной задержки. Так, для случая, представленного на рис.10, нужно ввести опережение работы наземного ионозонда на несколько миллисекунд. При этом получается совмещенная ионограмма наземного зондирования, таким образом, как показано на рис. 11.

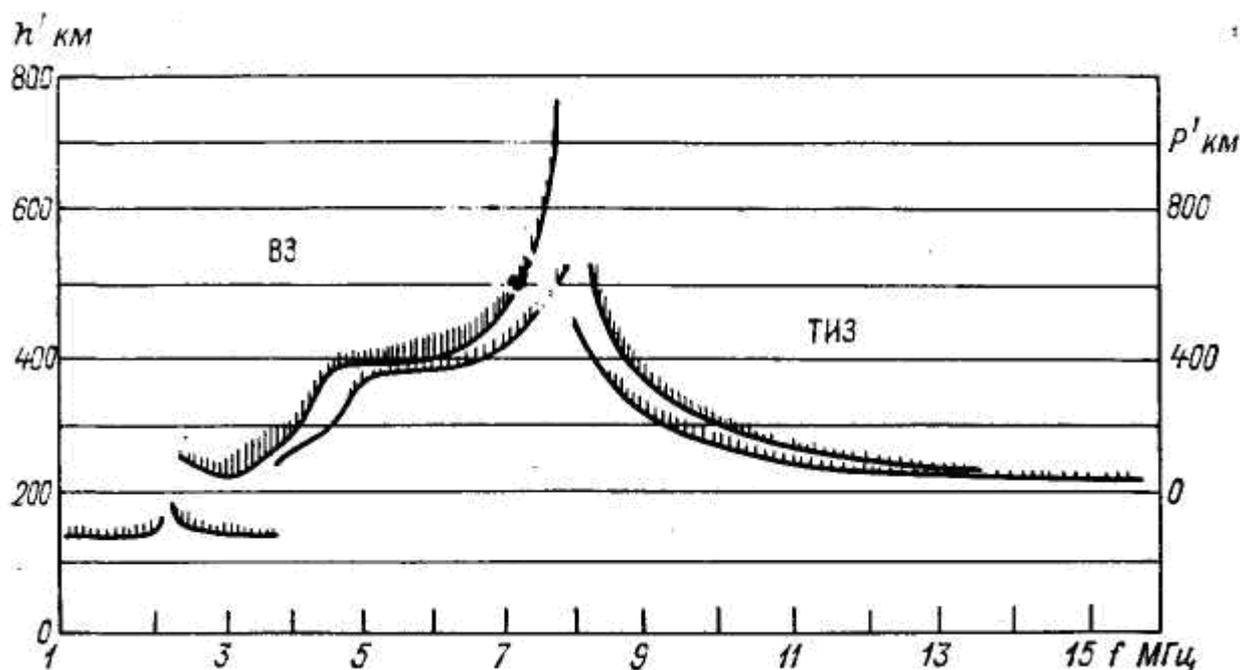


Рис. 11. Ионограмма наземного зондирования, совмещенная с трансionoсферной ионограммой.

Разумеется, в зависимости от наклонной дальности спутника временные интервалы принятых сигналов будут перемещаться внутри диапазонов «открытых окон» приемников. Однако, как хорошо видно из гистограммы для реальных наклонных дальностей настоящего спутника «Ионосфера», упомянутых «окон открытости» вполне достаточно.

Следовательно, трансionoсферное зондирование будет осуществляться как в прямом, так и в обратном режимах, при этом, как правило, оба режима будут включаться одновременно.

Точная привязка к мировому времени производится по стандарту UTC (Всемирное координированное время, рекомендация ИТУ-R, TF.460-6) с помощью интегрированных в оба ионозонда приемников GPS или ГЛОНАСС.

Имеется возможность организовать центры приема информации на существующих ионосферных станциях Росгидромета. На Рис. 12 и 13 в качестве примера приведены Певек (69°с.ш., 170°в.д.), Ловозеро (68°с.ш., 35°в.д.), Шпицберген (78°с.ш., 14°в.д.), Диксон (74°с.ш., 81°в.д.). На этих станциях могут быть расположены как приемники спутниковой информации в режиме реального времени (канал 137 МГц), так и ионозонды для трансionoсферного зондирования.

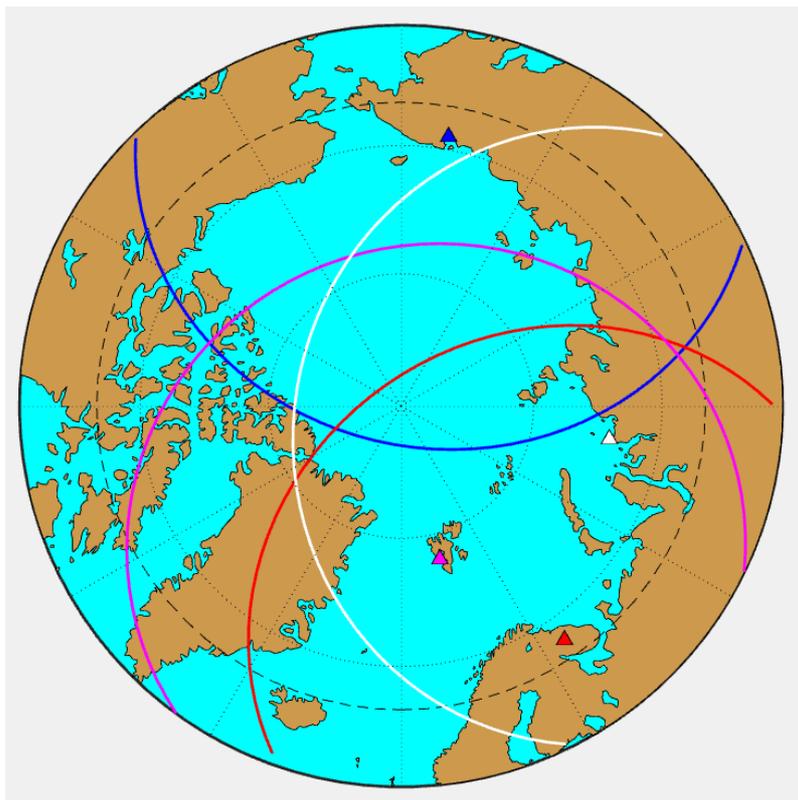


Рис. 12. Зоны покрытия станций приема для высоты орбиты 600 км.

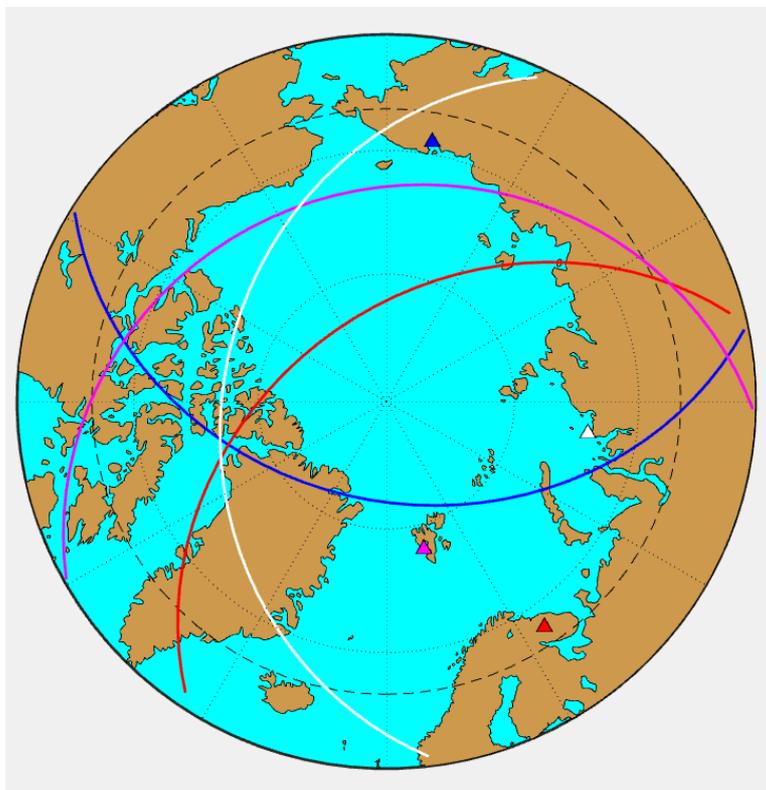


Рис. 13. Зоны покрытия станций приема для высоты орбиты 900 км.

Как видно из результатов моделирования, отображенных на этих рисунках, даже для высоты орбиты 600 км обеспечивается покрытие почти всей полярной шапки всего двумя станциями — на Чукотке и Шпицбергене. Для более высокой орбиты 900 км покрытие еще более полное. Тем не менее, дополнительные станции играют важную роль в обеспечении надежности системы сбора информации реального времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Традиционный метод спутникового зондирования с применением современных технологий позволяет эффективно производить мониторинг арктической ионосферы выше основного максимума. Если ограничить выбор орбитальной конфигурации космического комплекса арктической областью, то можно рекомендовать следующее:

1. Четыре спутника с ионозондами на борту находятся на орбитах, близких к полярным, в двух перпендикулярных плоскостях.
2. Орбиты являются круговыми с высотой 600–900 км.
3. Солнечная синхронность орбиты обеспечивается соответствующим наклоном к экватору.
4. Местное время в восходящих узлах для орбит составляет 3 ч и 9 ч (отклонение от терминатора  $45^\circ$ ).
5. Каждая пара спутников разведена в противоположные точки орбиты (расхождение  $180^\circ$ ).

В этом случае, из всех ионограмм, производимых каждым спутником за сутки, примерно 12% будут получены к северу от северного полярного круга. Имея комплекс из четырех аппаратов, мы можем обеспечить присутствие, по крайней мере, одного из них над северной полярной шапкой с вероятностью ~50% в любой момент времени. Учитывая, что пролеты спутников происходят через каждые полчаса, мы получаем возможность отслеживать развитие полярных бурь и эволюции достаточно долгоживущих ионосферных неоднородностей в виде разрезов ионосферы между орбитой спутника и максимумом. В дополнение к арктическим данным, комплекс будет поставлять информацию для средне- и низкоширотной ионосферы.

Показано, что введение управляемой временной задержки при приеме зондирующего радиопульса только на наземном ионозонде решает проблему регистрации данных прямого и обратного трансionoсферного зондирования и формирования комплексных данных зондирования ионосферы.

Оснащение наземных станций ионозондами, совместимыми со спутниковым ионозондом, позволяет получать прямые и обратные трансionoграммы, а дополнительные приемники на этих же станциях позволяют принимать ионограммы в реальном режиме времени, что уменьшает задержки по доставке ионограмм для обработки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-29-06052.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Труды института прикладной геофизики. Выпуск 91. Радиозондирование ионосферы спутниковыми и наземными ионозондами. Под ред. В.Б. Лапшина. М., ВНИИГМИ-МЦД, 2014.
2. Гивишвили Г.В., Данилкин Н. П., Гудков О.И., Журавлев С.В., Иванов И.И., Котонаева Н.Г., Крашенинников И.В., Цыбуля К.Г. Трансионoсферное радиозондирование на основе бортового ионозонда «Лазерт» и наземного ионозонда «Парус-А». Гелиогеофизические исследования, 12, с. 21–28, 2015
3. Балк Л.М. Элементы динамики космического полета. М.: Наука, Глав.ред.физ.-мат.лит., 1965.
4. Пулинец С.А.. Перспективы спутникового зондирования ионосферы в рамках проекта «Ионозонд». Гелиогеофизические исследования, 6, с. 1–7, 2013
5. Дьяков В.П., Журавлев С.В., Иванов И.И. Обеспечение синхронной работы спутниковых и наземных ионозондов в системе мониторинга ионосферы. Гелиогеофизические исследования, 2, 23–32, 2012.
6. Иванов И.И., Тертышников А.В. Согласование режимов работы бортовых и наземных ионозондов при системном мониторинге ионосферы в зависимости от ионосферных условий и задач эксперимента. Гелиогеофизические исследования, 11, с. 25–29, 2015

## **AN OUTLOOK OF THE SATELLITE RADIO-SOUNDING FROM THE LOW CIRCULAR ORBIT IN THE ARCTIC ZONE**

K.G. Tsybulya, N.P. Danilkin

The article considers capabilities and various optimizations of the future ionosphere-sounding satellite constellation on the sun-synchronous circle orbit from viewpoint of the near-Earth space monitoring over the Arctic region. With help of computer modeling, the orbits are selected to optimize solar illumination, informative content of the ionograms and getting real-time information.

**KEYWORDS:** SATELLITE RADIO SOUNDING, IONOSPHERE MONITORING.