

**МСЭ-R**

Сектор радиосвязи МСЭ

**Рекомендация МСЭ-R RS.2042-1**  
(12/2018)

**Типовые технические  
и эксплуатационные характеристики  
систем бортовых космических  
радиолокационных зондов,  
использующих полосу 40–50 МГц**

**Серия RS**  
**Системы дистанционного зондирования**



## Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

### Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

### Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>.)

Серия	Название
<b>BO</b>	Спутниковое радиовещание
<b>BR</b>	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
<b>BS</b>	Радиовещательная служба (звуковая)
<b>BT</b>	Радиовещательная служба (телевизионная)
<b>F</b>	Фиксированная служба
<b>M</b>	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
<b>P</b>	Распространение радиоволн
<b>RA</b>	Радиоастрономия
<b>RS</b>	<b>Системы дистанционного зондирования</b>
<b>S</b>	Фиксированная спутниковая служба
<b>SA</b>	Космические применения и метеорология
<b>SF</b>	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
<b>SM</b>	Управление использованием спектра
<b>SNG</b>	Спутниковый сбор новостей
<b>TF</b>	Передача сигналов времени и эталонных частот
<b>V</b>	Словарь и связанные с ним вопросы

*Примечание.* – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация  
Женева, 2019 г.

© ITU 2019

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

## РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R RS.2042-1

**Типовые технические и эксплуатационные характеристики систем бортовых космических радиолокационных зондов, использующих полосу 40–50 МГц**

(2014-2018)

**Сфера применения**

В настоящей Рекомендации приводятся технические и эксплуатационные характеристики бортовых космических радиолокационных зондов, которые будут работать в диапазоне частот около 45 МГц. Эта информация должна использоваться в исследованиях совместимости.

**Ключевые слова**

Спутниковая служба исследования Земли (активная), бортовой космический активный датчик, радиолокационный зонд, поверхность ледникового ложа, подповерхностные рассеивающие слои, реликтовые водоносные горизонты в пустынных природных средах, радиолокационный зонд неглубокого проникновения (SHARAD).

**Соответствующие Рекомендации и Отчеты МСЭ-R**

Проект нового Отчета МСЭ-R RS.[VHF\_SOUNDERS] "Предварительные результаты исследований совместного использования частот радиолокационными зондами, работающими на частоте 45 МГц, и действующими фиксированной службой, подвижной службой, радиовещательной службой и службой космических исследований, работающими в диапазоне частот 40–50 МГц".

Отчет МСЭ-R M.2234 "Возможность совместного использования поддиапазонов океанографическими радарными, работающими в радиолокационной службе, а также фиксированной и подвижной службами в диапазоне частот 3–50 МГц".

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

- a) что бортовые космические радиолокационные зонды могут обеспечивать радиолокационные карты подповерхностных рассеивающих слоев, позволяющие определять местонахождение водных/ледовых отложений, используя активное космическое зондирование;
- b) что научные задачи полетов заключаются в том, чтобы 1) получить представление об общей толщине, внутренней структуре и термической устойчивости ледниковых щитов Земли, таких как в Гренландии и Антарктиде, как о наблюдаемых параметрах изменения климата Земли, а также 2) получить представление о появлении, распределении и динамических свойствах реликтовых водоносных горизонтов в пустынных природных средах, таких как Северная Африка и Аравийский полуостров, как о важнейших составляющих понимания недавних палеоклиматических изменений;
- c) что необходимо измерить коэффициент отражения радиоволн от подповерхностных рассеивающих слоев на глубине от 10 м до 100 м;
- d) что глубина проникновения длин волн в подповерхностные рассеивающие слои на СВЧ-волнах увеличивается приблизительно в обратной зависимости от частоты;
- e) что для проведения в мировом масштабе многократных измерений подповерхностных водных отложений в пустынных природных средах, таких как Северная Африка и Аравийский полуостров, и многократных измерений ледниковых щитов, таких как в Гренландии и Антарктиде, требуется использовать бортовые космические активные датчики;
- f) что для удовлетворения всех требований к бортовым космическим радиолокационным зондам желательно использовать диапазон частот 40–50 МГц;

- g) что полоса 40–50 МГц распределена фиксированной, подвижной и радиовещательной службам на первичной основе;
- h) что использование полосы частот 40,98–41,015 МГц службой космических исследований осуществляется на вторичной основе;
- i) что относящиеся к странам примечания к Таблице распределения частот в полосе 40–50 МГц обеспечивают распределения на первичной основе любительской, радиовещательной, фиксированной и подвижной, воздушной радионавигационной и радиолокационной службам в некоторых частях мира;
- j) что бортовые космические радиолокационные зонды будут работать с другими первичными и вторичными службами в соответствии с пунктом 4.4 РР на основе непричинения помех, а также они не должны создавать вредных помех и не должны требовать защиты;
- k) что полосы шириной 10 МГц достаточно для использования бортовыми космическими радиолокационными зондами;
- l) что были определены эксплуатационные ограничения, позволяющие работать в соответствии с пунктом 4.4 РР на основе непричинения помех, например работать только в незаселенных или малонаселенных районах ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды и пустынь Северной Африки и Аравийского полуострова, а также эксплуатировать радары только в ночное время, с 3 до 6 часов утра по местному времени, как указано в Приложении 1,

*рекомендует,*

чтобы приведенные в таблице 1 Приложения характеристики применялись в бортовом космическом радиолокационном зонде и использовались в исследованиях совместимости.

## Приложение

### Типовые технические и эксплуатационные характеристики систем бортовых космических радиолокационных зондов, использующих полосу 40–50 МГц

#### 1 Введение

В сообществе климатологов существует интерес к дистанционному зондированию близких к поверхности слоев земной коры в полосе частот около 40–50 МГц с помощью бортовых космических активных датчиков для получения радиолокационных карт подповерхностных рассеивающих слоев, по которым можно определить места залегания воды, льда и различных отложений, а также исследовать подледные поверхности ледникового ложа. В настоящем Приложении обосновывается выбор предпочтительной полосы частот, а также приводятся типовые технические и эксплуатационные характеристики.

В настоящем Приложении описываются технические и эксплуатационные характеристики бортового космического активного датчика, работающего в диапазоне частот 40–50 МГц, и рассматривается совместное использование частот с другими службами, имеющими распределения в этом диапазоне частот.

#### 2 Обоснование выбора полосы частот

Основанием для осуществления распределения бортовым космическим зондирующим радаром в диапазоне от 40 МГц до 50 МГц являются следующие критерии выбора: проникновение сквозь поверхность, шкала длин волн наблюдений, область применимости модели электромагнитного рассеяния и ранее проведенная работа.

## 2.1 Проникновение сквозь поверхность

Падающая волна, излучаемая радаром, как правило, проникает в виде волн с несколькими десятками длин. При соответствующих условиях, соответствующих длине волны, и составе рассеивающей среды радиоволны могут свободно проникать сквозь диэлектрические материалы, образующие земную поверхность и земной покров. Количественная оценка глубины проникновения  $\delta_p$  получается из следующего выражения:

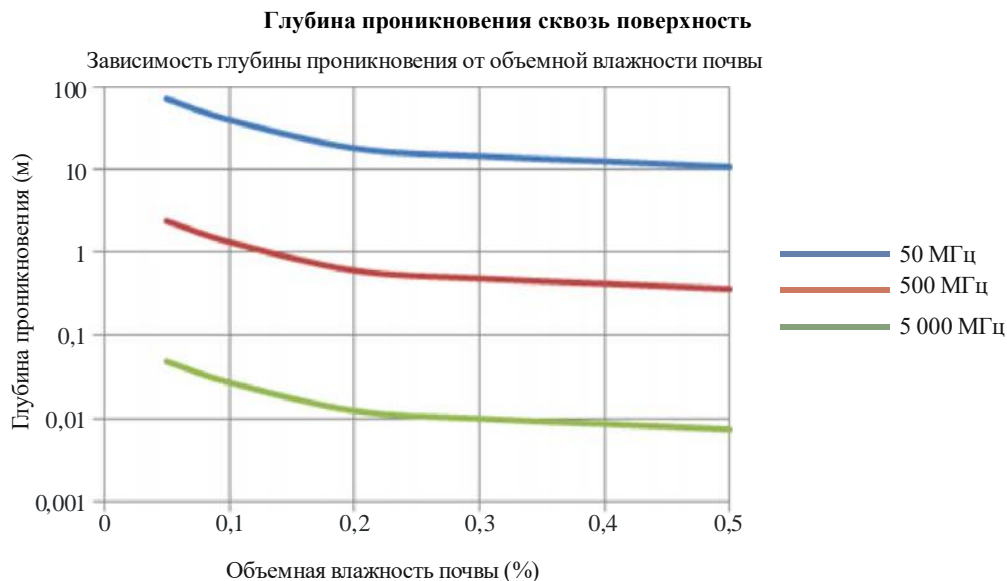
$$\delta_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{e'}}{2\pi e''}, \quad (1),$$

где:

- $\lambda_0$ : длина волны;
- $e'$  и  $e''$ : действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости поверхности.

На рисунке 1 показаны глубины проникновения сквозь поверхность для частот 50 МГц, 500 МГц и 5000 МГц, полученные с использованием этого выражения и значений диэлектрической проницаемости почвы. Из этого рисунка видно, что глубина проникновения сквозь поверхность на частоте 50 МГц в 20–30 раз больше, чем на частоте 500 МГц. Поэтому эта частота наиболее благоприятна для проведения исследований путем проникновения сквозь поверхность Земли. Задачи заключаются в том, чтобы обеспечить радиолокационные карты подповерхностных рассеивающих слоев для определения местоположения водных/ледовых отложений с помощью бортовых космических активных датчиков.

РИСУНОК 1



RS.2042-01

## 2.2 Шкала длин волн наблюдений

Добавление диапазона 50 МГц к существующим диапазонам 435 МГц и 1250 МГц расширило бы пределы шкалы длины волн, на которых наблюдается неровность поверхности. Для многих геологических поверхностей характерно преобладание в обратном рассеянии той гармонической составляющей поверхности, длина волны которой близка к длине волны, излучаемой радаром, или превышает ее. При этом значимость других составляющих поверхности проявляется только в виде побочных эффектов. Таким образом радиолокационные измерения, проводимые на возможно большем количестве частот при максимально широком диапазоне углов падения, увеличивают возможность точного описания этой поверхности.

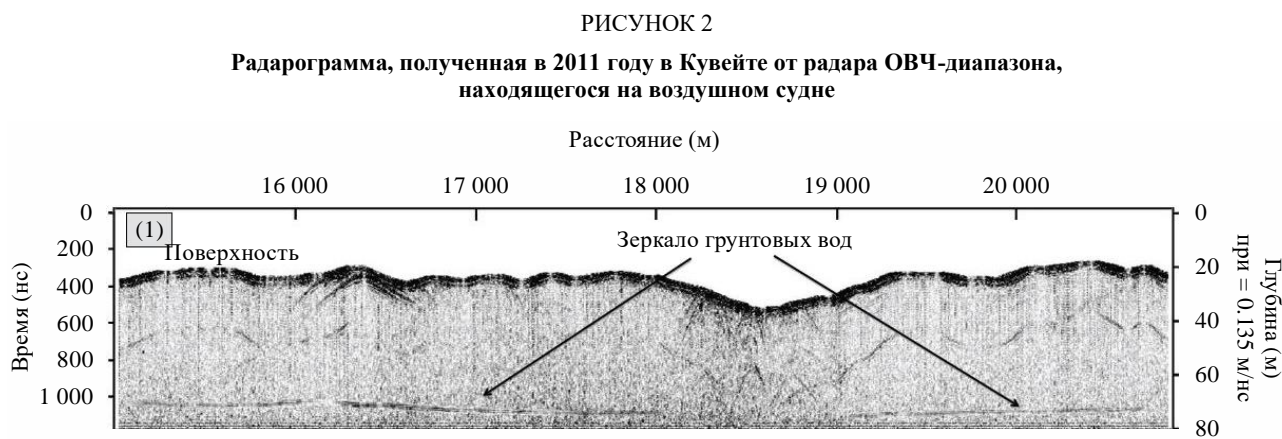
### 2.3 Область применимости модели электромагнитного рассеяния

Добавление диапазона 50 МГц к существующим диапазонам 435 МГц и 1250 МГц расширило бы область применимости моделей электромагнитного рассеяния. Радары диапазона 50 МГц должны быть более чувствительными к структуре подповерхностного слоя, потому что среднеквадратичная высота поверхностного слоя составляет меньшую долю длины волны, что позволяет измерять более слабый радиолокационный сигнал обратного рассеяния. Повышенная чувствительность в диапазоне 50 МГц к структуре подповерхностного слоя в сочетании с тем обстоятельством, что в этом диапазоне сигналы глубже проникают в почву, увеличивает объем подповерхностного слоя, в котором возникает рассеяние. Это приводит к гораздо более высокому отношению мощности сигнала, принятого от подповерхностного слоя, к мощности сигнала, принятого от поверхности, чем на более коротких волнах. Кроме того, размер рассеивателей, содержащихся в аллювиальном покрове, будет меньше относительно 50 МГц, чем относительно 435 МГц или 1250 МГц.

### 2.4 Ранее проведенная работа и регламентарный статус полосы 40–44 МГц

Весьма значительный объем работы в виде разработки радиолокационных систем наземного и воздушного базирования и сбора данных уже выполнен в диапазоне 3–50 МГц. Наряду с разработкой аппаратного обеспечения были осуществлены расчеты, направленные на изучение зависимости глубины проникновения сквозь поверхность от содержания влаги в почве в диапазоне 3–50 МГц и проведен анализ результатов измерения отражений от поверхности океана океанографическими радарными.

Радарами, находящимися на воздушном судне, были выполнены измерения в диапазоне около 50 МГц в пустынных районах Аравийского полуострова и в Антарктиде. На рисунке 2 изображена радарограмма, показывающая изменение глубины залегания зеркала грунтовых вод в пределах от 49 до 52 метров, при этом данные были получены в 2011 году в Кувейте от радара ОВЧ-диапазона, находящегося на воздушном судне.



RS.2042-02

Возможность использования диапазона частот 3–50 МГц для расположенных вдоль побережья океанографических радаров (радиолокационной службы (РЛС)) была рассмотрена в рамках пункта 1.15 повестки дня ВКР-12, и исследования совместного использования частот были отражены в Отчете МСЭ-R М.2234. ВКР-12 приняла решение осуществить распределение РЛС посредством ряда вторичных и первичных распределений на региональной основе и по странам, используя примечания в поддиапазонах частот от 4 до 44 МГц (полоса частот 43,35–44 МГц стала самой высокой полосой, распределенной РЛС с использованием примечаний для стран (две страны)), и примечания для защиты существующих служб – фиксированной и подвижной. Применения РЛС ограничены океанографическими радарными, работающими в соответствии с Резолюцией 612 (Пересм. ВКР-12). В этой Резолюции содержатся дополнительные ограничения для океанографических радаров, такие как максимальная э.и.и.м. в 25 дБВт и опознавание станции (позывной) на присвоенной частоте. В Регламенте радиосвязи отсутствует распределение ССИЗ (активной) в диапазоне 3–50 МГц. Если для

бортовой космической системы будут выбраны частоты в более высоких или более низких полосах, то потребуется повторно подготовить справочный документ, посвященный аппаратному обеспечению и расчетам для работы радаров, находящихся на воздушном судне, в пустынных районах.

### **3 Технические характеристики бортового космического зондирующего радара диапазона 40–50 МГц**

Бортовой космический зондирующий радар (радиолокационный зонд) будет работать на центральной частоте 45 МГц в полосе частот шириной 10 МГц, а полученные от него данные будут использоваться для изучения близких к поверхности слоев земной коры и составления радиолокационных карт поверхностных рассеивающих слоев, по которым можно будет определять места залегания воды, льда и различных отложений. Характеристики бортового космического зондирующего радара, работающего в диапазоне частот 45 МГц, приведены в таблице 1.

#### **3.1 Задачи полета**

Бортовой космический активный датчик, работающий в диапазоне частот 40–50 МГц, будет вырабатывать данные о подповерхностном слое земной коры с вертикальным разрешением 5–7 м: отношение сигнал/шум на поверхности будет равно 66 дБ. Орбитальной картографической программой планируется проведение контрольно-испытательных работ на орбите в течение одного месяца и сбор научных данных в течение 18 месяцев. Научные задачи полета заключаются в том, чтобы 1) получить представление об общей толщине, внутренней структуре и термической устойчивости ледниковых щитов Земли, таких как в Гренландии и Антарктиде, как о наблюдаемых параметрах изменения климата Земли, а также 2) получить представление о появлении, распределении и динамических свойствах реликтовых водоносных горизонтов в пустынных природных средах, таких как Северная Африка и Аравийский полуостров, как о важнейших составляющих понимания недавних палеоклиматических изменений. Восемнадцать месяцев – достаточный срок для сбора данных из районов, представляющих научный интерес, с шагом траектории надиром 5 км на экваторе при использовании точно повторяющейся орбиты высотой 400 км с периодом повторения трассы 548 дней (18 месяцев). Ввиду временной нестабильности, присущей как ледяным полям, так и водоносным горизонтам в пустынных природных средах, последующие научные исследования длительностью по 18 месяцев предполагается проводить раз в десять лет.

Следует отметить, что с учетом высоких инвестиционных затрат, связанных с таким зондированием в полосе частот 40–50 МГц, число одновременно проводимых исследований такого рода будет скорее всего оставаться крайне малым и вряд ли превысит два.

#### **3.2 Параметры орбиты**

Бортовой космический активный датчик размещается на спутнике, находящемся на низкой околоземной орбите на высоте 400 км; наклон орбиты оптимизирован для солнечно-синхронной орбиты с эксцентриситетом менее 0,001. Параметры орбиты приведены в таблице 1.

#### **3.3 Проектные параметры**

Гипотетический радиолокационный зонд на околоземной орбите представляет собой усовершенствованную для земных условий копию радиолокационного зонда неглубокого проникновения (SHARAD) – зондирующего радара, работавшего на околомарсианской орбите в полосе частот 15–25 МГц. Бортовой космический зондирующий радар передает ЧМ-импульсы с центральной частотой 45 МГц и шириной полосы 10 МГц при частоте повторения импульсов 1200 Гц. Длительность каждого импульса составляет 85 мкс. Пиковая мощность РЧ-сигнала равна 100 Вт; передаваемый сигнал имеет круговую поляризацию. Эти проектные параметры приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1

## Характеристики бортового космического зондирующего радара диапазона 45 МГц

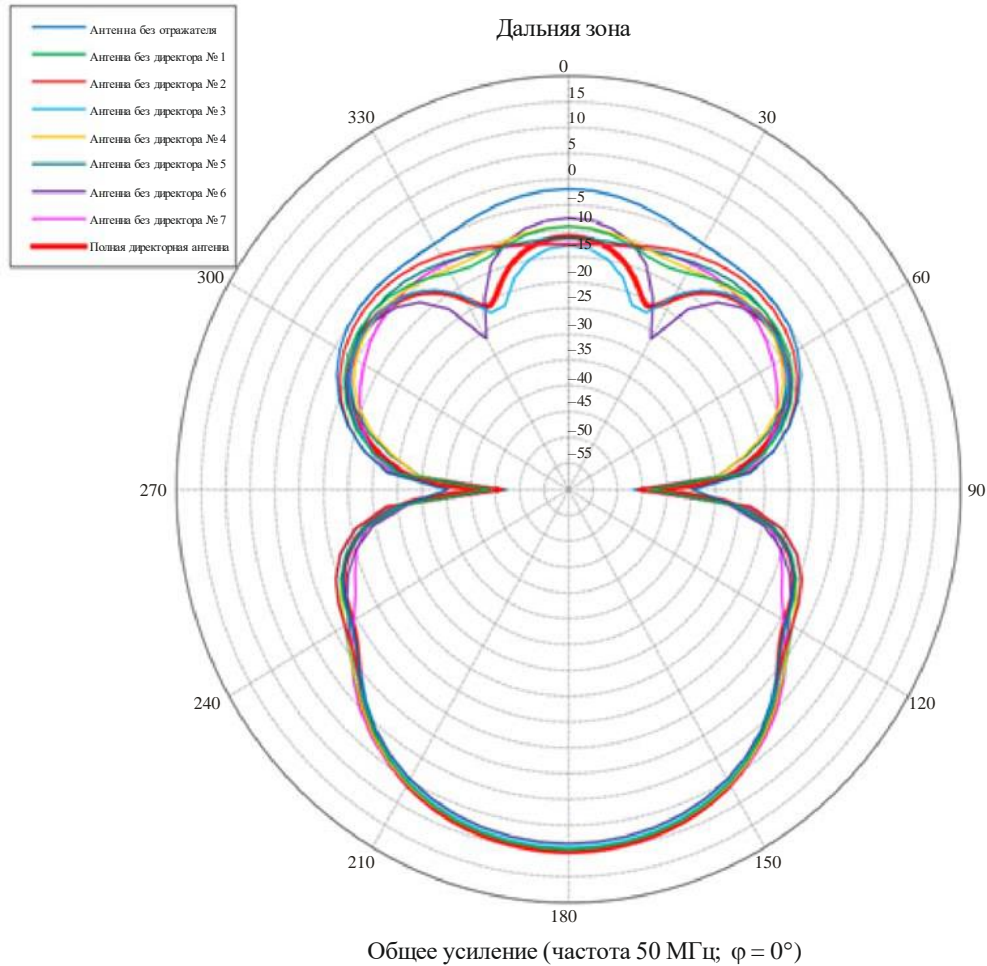
Характеристики зонда	
Параметр	Значение
Тип	Радиолокационный зонд
<b>Характеристики орбиты</b>	
Тип орбиты	Солнечно-синхронная
Высота (км)	400
Наклонение (градусы)	97°
Местное солнечное время восходящего узла	004:00
Эксцентриситет (градусы)	0°
Число оборотов в сутки	15,8
Период повторения трассы (сутки)	548
<b>Характеристики антенны</b>	
Тип антенны	9-элементная крестообразная директорная
Количество лучей	1
Пиковое усиление (на передачу и прием – дБи)	10
Поляризация	Круговая
Ширина луча по уровню –3 дБ (градусы)	40°
Угол обзора луча антенны (градусы)	Надир
Азимут луча антенны (градусы)	Надир
Ширина луча антенны по углу места (градусы)	40°
Ширина луча антенны по азимуту (градусы)	40°
Диаграмма направленности антенны датчика	См. рисунок 3
<b>Характеристики передатчика</b>	
Центральная частота РЧ-сигнала (МГц)	45
Ширина полосы радиочастот (МГц)	10
Пиковая мощность передаваемого сигнала (дБВт)	20
Длительность импульса (мкс)	85
Частота повторения импульсов (PRF) (Гц)	1 200
Импульсная модуляция	Линейная частотная модуляция (ЛЧМ)
<b>Характеристики приемника</b>	
Центральная частота РЧ-сигнала (МГц)	45
Коэффициент усиления (дБ)	40–50
Отношение сигнал/шум (дБ)	30
Ширина полосы пропускания МШУ (МГц)	> 100
Ширина полосы пропускания оконечного фильтра ПЧ (МГц)	12
Коэффициент шума (дБ)	5
Наименьший обнаруживаемый уровень сигнала (дБм)	–132
Динамический диапазон (дБ)	< 20



Антенна бортового космического зондирующего радара является 9-элементной крестообразной директорной антенной с коэффициентом усиления, равным 10 дБи, и шириной луча в  $40^\circ$  по дальности и азимуту, как показано на рисунке 3.

РИСУНОК 3

Диаграмма направленности 9-элементной директорной антенны



RS.2042-03

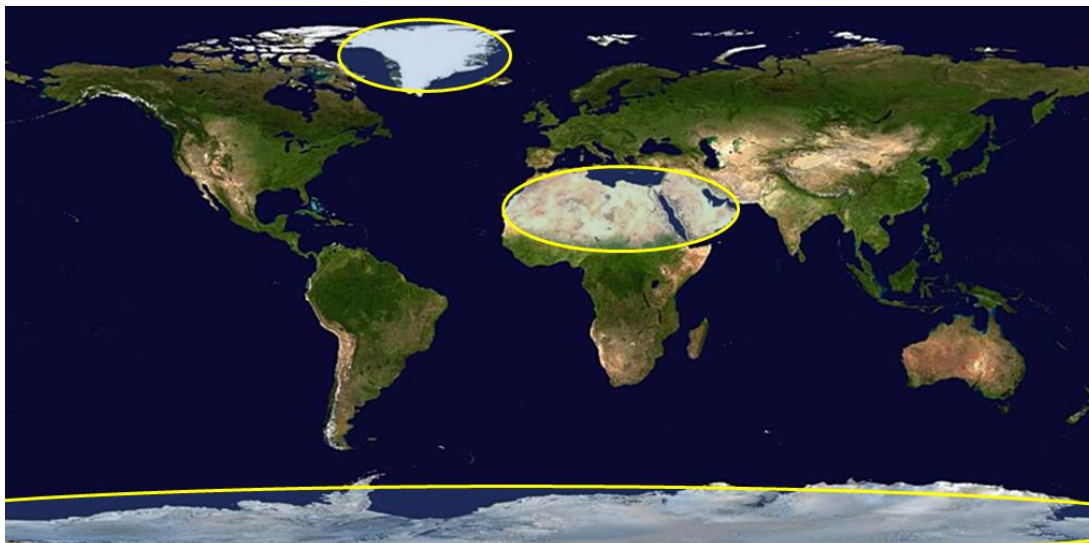
### 3.4 Эксплуатационные географические ограничения

Радиолокационный зонд должен работать исключительно в незаселенных или малонаселенных районах ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды и пустынь Северной Африки и Аравийского полуострова, и длительность его работы не должна превышать 10 минут на каждый оборот по орбите, составляющий 92,7 минуты.

Зоны покрытия в предлагаемых районах исследования, то есть географические области, по которым будет распространяться переданный сигнал, показаны на рисунке 4.

РИСУНОК 4

Зона покрытия бортового космического радиолокационного зонда



RS.2042-04

Радиолокационный зонд должен работать только в ночное время между 3 и 6 часами по местному времени. Это время выбрано потому, что оно характеризуется минимальным уровнем ионосферных возмущений, воздействующих на радиолокационный сигнал, и наименьшей вероятной интенсивностью использования тех же частот другими службами.

#### 4 Уровни п.п.м. и спектральной п.п.м. у поверхности Земли

Для приведенных в таблице 1 параметров зондирующего радара рассчитан уровень плотности потока мощности (п.п.м.) у поверхности Земли, который должен составлять  $-93,3$  дБ(Вт/м<sup>2</sup>) на частоте 45 МГц, что соответствует спектральной п.п.м. с уровнем  $-163,3$  дБ(Вт/(м<sup>2</sup> · Гц)) на частоте 45 МГц, исходя из полосы шириной 10 МГц.

#### 5 Выводы

Дистанционное зондирование в диапазоне около 40–50 МГц представляет интерес для проведения дистанционных измерений подземных слоев и обеспечения радиолокационных карт подповерхностных рассеивающих слоев для определения местоположения водных/ледовых отложений с помощью бортовых космических активных датчиков. В настоящем Приложении обоснован выбор предпочтительной полосы частот, а также приводятся типовые технические и эксплуатационные характеристики возможного прибора.

Сформулированы технические и эксплуатационные характеристики бортового космического радиолокационного зонда, который будет работать в диапазоне частот 40–50 МГц.