УДК 550.388.2

## ОСОБЕННОСТИ СВЕРХДАЛЬНЕГО И КРУГОСВЕТНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОТКИХ РАДИОВОЛН

А. А. Понятов<sup>1</sup>, Г. Г. Вертоградов<sup>2</sup>, В. П. Урядов<sup>1\*</sup>, Е. Г. Вертоградова<sup>2</sup>, В. В. Шумаев<sup>3</sup>, А. Г. Чернов<sup>3</sup>, Е. Г. Чайка<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород; <sup>2</sup> Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону; <sup>3</sup> ООО «Ситком», г. Йошкар-Ола, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей сверхдальнего и кругосветного распространения коротких радиоволн на радиолиниях с различной ориентацией и протяжённостью, полученные в 2012–2014 годах с помощью новой техники наклонного зондирования ионосферы. Определены частотно-временные интервалы прохождения прямых кругосветных сигналов, их амплитудно-частотные и угловые частотные характеристики. Предложен механизм распространения и трансформации кругосветных сигналов за счёт рефракции радиоволн на поперечных градиентах электронной концентрации в области сближения двух оптимальных трасс, проходящих через передатчик и приёмник, каждая из которых составляет наименыший угол с терминатором. Показано, что предложенный механизм хорошо согласуется с экспериментально наблюдаемым изменением азимута прямого кругосветного сигнала на трассе Кипр—Ростов-на-Дону и с отсутствием изменения азимута прямого кругосветного сигнала на трассе Алис Спрингс (Австралия)—Ростов-на-Дону. Показано, что для сверхдальнего распространения коротких радиоволн на трассах Вирджиния (США)—Йошкар-Ола и Пуэрто-Рико—Йошкар-Ола (дальности порядка 8 000÷10 000 км) наилучшие условия распространения имеют место, когда вся трасса проходит в освещённой ионосфере вблизи границы с терминатором, составляя с ним небольшой угол 10°÷25°.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследованию сверхдальнего и, в частности, кругосветного распространения радиоволн посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ (см., например, [1] и цитируемую там литературу). Этот интерес обусловлен возможностью оперативной диагностики ионосферы в планетарном масштабе, а также необходимостью решения практических задач дальней коротковолновой радиосвязи.

На основе многочисленных экспериментальных исследований установлено, что для сверхдальнего распространения существуют оптимальные условия, которые определяются ориентацией трассы относительно терминатора. Положение терминатора определяется как временем суток, так и временем года. Так, наилучшие условия для кругосветного распространения выполняются, когда трасса проходит вблизи терминатора, составляя с ним небольшой угол порядка  $10^{\circ} \div 20^{\circ}$  [2]. При этом могут быть рассчитаны наиболее вероятные временные интервалы прохождения кругосветных сигналов, обусловленные свойствами регулярной ионосферы. Такие расчёты хорошо подтверждаются экспериментами [3, 4].

Когда в ионосфере трасса распространения проходит вблизи терминатора уровень электронной концентрации вдоль неё достаточно высок, при этом электроны распределены практически равномерно. Это обеспечивает распространение радиоволн на сравнительно высоких частотах с малым затуханием. Другой особенностью распространения коротковолновых сигналов на трассах с большой протяжённостью является возможность их распространения поперёк или под углом

<sup>\*</sup> uryadovvp@nirfi.sci-nnov.ru

к терминатору, когда одна часть трассы находится в освещённой области ионосферы, а другая — в неосвещённой. При этом на переходе день—ночь, благодаря отрицательному градиенту электронной концентрации  $N_e$  вдоль направления от передатчика к приёмнику радиосигналов, существуют условия для рефракционного захвата радиоволн в ионосферные волновые каналы или в общем случае на рикошетирующие траектории без промежуточных отражений от Земли. На трансполярных и трансэкваториальных трассах радиоволны в ионосферные волновые каналы могут захватываться за счёт рассеяния на интенсивных мелкомасштабных неоднородностях [5]. На выходе из канала радиоволны могут выводиться на поверхность Земли на переходе ночь—день за счёт рефракции радиоволн, но уже на положительном градиенте концентрации  $N_e$  вдоль направления от передатчика к приёмнику радиосигналов, или за счёт других механизмов, например, рассеяния на ионосферных неоднородностях естественного или искусственного происхождения [2, 6].

Вопрос об оптимальной ориентации кругосветных трасс тесно связан с вопросом об отклонении пеленга кругосветного сигнала от дуги большого круга. Имеются экспериментальные доказательства как того, что кругосветный сигнал распространяется в плоскости дуги большого круга с небольшим отклонением от неё [1], так и того, что существуют значительные отклонения, достигающие десятка градусов [7]. Чтобы разобраться в этом вопросе, необходимы систематические наблюдения на кругосветных трассах с различной ориентацией с использованием современной техники наклонного зондирования. Такую возможность предоставляет ионозондрадиопеленгатор, работающий на постоянной основе и позволяющий наряду с измерением традиционных дистанционно-частотных (ДЧХ) и амплитудно-частотных (АЧХ) характеристик измерять угловые частотные характеристики (УЧХ) во всём диапазоне частот прохождения коротковолновых радиосигналов [8].

Использование ионозонда-радиопеленгатора в исследованиях дальнего и сверхдальнего распространения коротких радиоволн позволяет получать данные об аномальных сигналах, связанных с отражением и рассеянием радиоволн от неоднородных структур ионосферной плазмы с различными масштабами, а также с рассеянием от земли или водной поверхности. В сочетании с моделированием результаты наклонного зондирования с помощью ионозонда-радиопеленгатора позволяют позиционировать области ионосферы и земной поверхности (горы, возвышенности), ответственные за появление аномальных сигналов, и определять механизмы ионосферного распространения коротких радиоволн.

Оперативное получение таких данных играет важную роль для обеспечения эффективного функционирования радиоэлектронных систем различного назначения, что особенно актуально при работе в условиях Крайнего Севера, Арктики и Северной Атлантики на протяжённых морских и воздушных трассах, подверженных воздействию магнитно-ионосферных возмущений.

В работе представлены результаты исследований сверхдальнего и кругосветного распространения коротких радиоволн на трассах Кипр—Ростов-на-Дону, Алис Спрингс (Австралия)—Ростов-на-Дону, Лейвертон (Австралия)—Ростов-на-Дону, Кипр—Йошкар-Ола, Алис Спрингс (Австралия)—Йошкар-Ола, Вирджиния (США)—Йошкар-Ола и Пуэрто-Рико—Йошкар-Ола, полученные в 2012–2014 годах с помощью ионозонда-радиопеленгатора с линейной частотной модуляцией сигнала (ЛЧМ) и модифицированного ЛЧМ-ионозонда.

### 1. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Наблюдения прохождения коротковолновых сигналов проводились в период с декабря 2012 года по март 2013 года на трассах Кипр—Ростов-на-Дону, Кипр—Йошкар-Ола, в ноябре–декабре 2013 года на трассах Алис Спрингс (Австралия)—Ростов-на-Дону, Лейвертон (Австралия)—Рос-

тов-на-Дону, Алис Спрингс (Австралия)—Йошкар-Ола, в январе-феврале 2014 года на трассах Вирджиния (США)—Йошкар-Ола и Пуэрто-Рико—Йошкар-Ола. В г. Ростов-на-Дону измерения проводились с помощью ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора, а в г. Йошкар-Ола — с помощью модернизированного ЛЧМ-ионозонда.

ЛЧМ-передатчики на Кипре (34,6° с. ш., 33° в. д.), Австралии (Алис Спрингс, 22,96° ю. ш., 134,45° в. д., и Лейвертон, 28,6° ю. ш., 122,4° в. д.), в США (Вирджиния, 37,56° с. ш., 77° з. д.) и Пуэрто-Рико (18,38° с. ш., 65,29° з. д.) предназначены для зондирования ионосферного канала и входят в сервисную систему загоризонтной коротковолновой радиолокации [9–11].

На Кипре два ЛЧМ-передатчика нагружены на две антенны с азимутальными направлениями 7° и 57° и шириной диаграммы направленности около 60°. Для каждого передатчика начальная частота равна 8 МГц, конечная частота равна 35 МГц, скорость изменения частоты равна 100 кГц/с, период повторения всегда равен 300 с.

В Австралии ЛЧМ-передатчик в Алис Спрингс нагружен на антенну с азимутальным направлением 315° и общей шириной диаграммы направленности 180°. ЛЧМ-передатчик в Лейвертон нагружен на антенну с азимутальным направлением 350° и общей шириной диаграммы направленности 180°.

Для ЛЧМ-передатчиков в Австралии начальная частота зондирования всегда равна 5 МГц, скорость изменения частоты составляет 125 кГц/с, время пуска и период повторения изменяются по случайному закону с шагом в 30 с. Значение конечной частоты устанавливается в зависимости от условий распространения и определяется периодом повторения зондирования. Максимальная конечная частота равна 45 МГц.

ЛЧМ-передатчик в Вирджинии (США) нагружен на антенну с азимутальным направлением 170° и шириной диаграммы направленности около 90°. Аналогичные характеристики имеет оборудование в Пуэрто-Рико. В обоих пунктах начальная частота зондирования всегда равна 2 МГц, конечная частота равна 20 МГц, скорость изменения частоты составляет 100 кГц/с, период повторения всегда равен 720 с, а время пуска изменяется по случайному закону.

Приём ЛЧМ-сигналов осуществлялся в Ростове-на-Дону и Йошкар-Оле. В г. Ростов-на-Дону приём сигналов проводился с помощью ионозонда-радиопеленгатора. В качестве приёмной антенны использовалась 16-элементная антенная решётка, размещённая на площадке 100 × 100 м [8]. В приёмном комплексе использованы 16-канальное когерентное радиоприёмное устройство и 16-канальный 16-разрядный когерентный аналого-цифровой преобразователь. Мгновенная полоса частот анализа ЛЧМ-сигнала для получения одной точки по частоте составляла 40 кГц, шаг по частоте — 40 кГц.

В г. Йошкар-Ола приём ЛЧМ-сигналов осуществлялся с помощью модернизированного программно-аппаратурного комплекса приёма зондирующих сигналов, в качестве приёмной антенны использовался широкополосный горизонтальный диполь. Приёмная аппаратура подробно описана в работах [12–15].

Во время наблюдений кругосветных сигналов в целом магнитная обстановка была спокойной, индекс  $K_{\rm p}$  составлял 0÷2(3), рентгеновских вспышек классов М и Х, способных вызвать сильное поглощение радиоволн, не было, за исключением 16.11.2013 и 01.02.2014. 16 ноября 2013 года магнитная обстановка была умеренно-спокойной, индекс  $K_{\rm p} \approx 1\div3$ . В этот день было 2 небольших рентгеновских вспышки. Одна класса М1,0 начало в 01:19 UT, максимум потока в 01:25 UT и на уровне 0,5 максимума в 01:38 UT. Вторая вспышка относилась к классу М3,0, начало в 07:14 UT, максимум потока в 07:23 UT и на уровне 0,5 максимума в 07:36 UT. 1 февраля 2014 года магнитная обстановка была умеренно-спокойной, индекс  $K_{\rm p} \approx 0\div3$ . В этот день было 2 небольших рентгеновских вспышки. Одна класса М1,2, начало в 04:47 UT, максимум потока в 04:53 UT и на уровне 0,5 максимума в 04:57 UT. Вторая вспышка относилась к классу М1,6,



Рис. 1. Прямые кругосветные сигналы (1) и сигналы обратного эха (2) на трассе Кипр—Ростов-на-Дону, 05:20 UT 06.02.2013. Панель (a) соответствует ДЧХ, панель (б) — АЧХ, панели (e) и (e) — УЧХ (угол места  $\Delta$  и азимут  $\alpha$  соответственно)

начало в 07:45 UT, максимум потока в 07:49 UT и на уровне 0,5 максимума в 07:53 UT [16].

## 1.1. ТРАССЫ КИПР-РОСТОВ-НА-ДОНУ И КИПР-ЙОШКАР-ОЛА

На трассе Кипр—Ростов-на-Дону с протяжённостью 1460 км, кроме прямых сигналов, принимались прямые кругосветные сигналы с задержкой около 143 мс и сигналы обратного эха с задержкой около 132 мс, принимаемые с обратного направления относительно направления на Кипр. В зимние месяцы (декабрь 2012 года–февраль 2013 года) прямые кругосветные сигналы регистрировались в основном с 04:30 до 07:30 UT. Пример ионограммы с одновременным приёмом прямого кругосветного сигнала и сигнала обратного эха с помощью ЛЧМ-ионозондарадиопеленгатора показан на рис. 1.

Для типичного дня наблюдений 06.02.2013 на рис. 2 показан временной ход диапазона частот прямого кругосветного сигнала и его усреднённых по частоте измеряемых характеристик (ДЧХ, АЧХ и УЧХ). Здесь же на рис. 2*a* сплошной линией показано изменение со временем угла  $\beta$  между трассой Кипр—Ростов-на-Дону и терминатором. Из рис. 2*a* видно, что прямой кругосветный сигнал наблюдается, когда угол  $\beta \leq 40^{\circ}$ . С увеличением угла  $\beta$  амплитуда прямого кругосветного сигнала падает: от -90 дБ для  $\beta \approx 3^{\circ}$  (04:30 UT) до -105 дБ для  $\beta \approx 40^{\circ}$  (07:30 UT, см. рис. 2*b*).

Для сравнения на рис. 3 показан временной ход диапазона частот прохождения прямого кругосветного сигнала (рис. 3*a*) и интервала его задержек (рис. 3*b*) по данным регистрации на трассе Кипр—Йошкар-Ола. Сплошной линией на рис. 3*a* показан угол  $\beta$  между трассой и терминатором. Из рис. 3*a* видно, что прямой кругосветный сигнал наблюдается, когда угол  $\beta \approx 12^{\circ} \div 25^{\circ}$ , что соответствует аналогичным данным на трассе Кипр—Ростов-на-Дону (см. рис. 2*a*). Заметим, что трассы Кипр—Йошкар-Ола и Кипр—Ростов-на-Дону близки по своей ориентации, угол между ними составляет 1,9°.

Как видно из рис. 2*a* диапазон частот прохождения прямого кругосветного сигнала на трассе Кипр—Ростов-на-Дону  $f_{\rm HHY}$ :  $f_{\rm MHY}$  варьируется от 8:17 МГц в 04:50 UT до 15:24 МГц в





Рис. 2. Временны́е характеристики прямого кругосветного сигнала на трассе Кипр—Ростов-на-Дону 06.02.2013: диапазон частот  $f_{\rm HHY} \div f_{\rm MHY}$  (*a*), амплитуда (*b*), задержка (*b*), угол места (*c*) и азимут (*d*). Кривая 1 соответствует углу  $\beta$  между трассой и терминатором, кривая 2 — расчётному азимуту прямого кругосветного сигнала, кривая 3 — углу  $\theta$  между оптимальными трассами для Ростова и Кипра, штриховая линия — азимуту прямого сигнала на Кипр

А.А. Понятов, Г.Г. Вертоградов, В.П. Урядов и др.



Рис. 3. Временны́е характеристики прямого кругосветного сигнала на трассе Кипр—Йошкар-Ола 22.01.2013: диапазон частот  $f_{\rm HHY} \div f_{\rm MHY}$  (*a*), задержка (*б*). Кривая 1 соответствует углу  $\beta$  между трассой и терминатором

07:05 UT. Здесь  $f_{\rm HHY}$  и  $f_{\rm MHY}$  — наименьшая и максимальная наблюдаемые частоты соответственно.

На трассе Кипр—Йошкар-Ола диапазон частот прохождения прямого кругосветного сигнала варьируется от максимальных значений 16,7÷22,8 МГц в 05:50÷06:15 UT до минимальных значений 17,5÷18,8 и 17÷18,2 МГц в 05:35 и 06:35 UT соответственно (см. рис. 3*a*).

Сопоставление данных по двум трассам показывает, что как временной интервал прохождения прямого кругосветного сигнала, так и его частотный диапазон на трассе Кипр—Йошкар-Ола заметно меньше, чем на трассе Кипр—Ростов-на-Дону. Мы полагаем, что в первую очередь это отличие определяется выигрышем по чувствительности, достигаемой в приёмном пункте Ростовна-Дону за счёт использования фазированной антенной решётки и специальной обработки разностного ЛЧМ-сигнала, позволившей увеличить динамический диапазон до 110 дБ.

Усреднённый по частоте диапазон задержек прямого кругосветного сигнала на трассе Кипр— Ростов-на-Дону варьируется от значений 142,2÷144,0 мс в 04:50 UT до 142,3÷143,0 мс в 07:20 UT, т. е. средняя задержка незначительно уменьшается (от 143,1 до 142,7 мс, см. рис. 26).

На трассе Кипр—Йошкар-Ола диапазон задержек прямого кругосветного сигнала варьируется в небольших пределах 145,4÷146,5 мс (см. рис. 36).

Вертикальные углы прихода прямого кругосветного сигнала на трассе Кипр—Ростов-на-Дону лежат в интервале  $5^{\circ} \div 16^{\circ}$ , при этом какое-либо преимущественное группирование по частоте и времени наблюдений отсутствует (см. рис. 2*г*).

Интересная особенность имеет место для азимутальных характеристик прямого кругосветного сигнала на трассе Кипр—Ростов-на-Дону. Как видно из рис. 2 $\partial$ , на временном интервале прохождения прямого кругосветного сигнала его азимут увеличивается от  $\alpha \approx 203^{\circ} \div 207^{\circ}$  (04:30 UT), что близко к направлению на Кипр (соответствующий угол  $\alpha = 203^{\circ}$  показан пунктиром), до  $\alpha \approx 220^{\circ} \div 225^{\circ}$  (07:00 UT), т. е. с заметным отклонением от дуги большого круга.

Такое отклонение азимута можно объяснить следующим образом. С точки зрения минимизации потерь при распространении в кругосветном канале вполне вероятно, что трасса кругосветного сигнала «отслеживает» положение терминатора и, насколько это возможно, приближается к нему. Вероятно, с этим связано изменение азимута кругосветного сигнала со временем. Для подтверждения данного предположения мы рассчитали азимут трассы, проходящей через приёмный пункт Ростов-на-Дону, которая составляет наименьший угол с терминатором (см. рис. 2*д*,

линия 2). Как видно из рис. 2*д*, в интервале времени 04:30÷06:00 UT расчётный азимут оптимальной трассы, составляющей наименьший угол с терминатором, достаточно хорошо согласуется с измеренным азимутом. После 06:00 UT растёт расхождение между расчётными и экспериментальными азимутами.

Таким образом, предположение об изменении азимута прямого кругосветного сигнала с привязкой трассы к терминатору в интервале времени 04:30÷06:00 UT подтверждается. При этом возникает вопрос о трансформации сигнала с одной трассы на другую с отличающимся азимутом. Для решения этого вопроса предложим, что сигнал, излучённый с Кипра в достаточно широком секторе азимутальных углов, при распространении на сверхдальние расстояния будет иметь наименьшие потери на трассе, составляющей наименьший угол с терминатором. После расчёта таких оптимальных трасс, проходящих через Ростов-на-Дону и Кипр (на временно́м интервале прохождения прямого кругосветного сигнала), можно определить углы  $\theta$  между ними. Эти данные показаны на рис. 2d (линия 3).

широта, градусы



Рис. 4. Проекции трасс кругосветного распространения на поверхность Земли в 06:00 UT 06.02.2013. Точка К соответствует Кипру, точка Р — Ростовуна-Дону,  $\theta$  — угол между трассами, проходящими через Кипр и Ростов-на-Дону, каждая из которых составляет наименьший угол с терминатором. Цифрами 1 и 2 отмечены точки пересечения этих оптимальных трасс. Приведены изолинии критических частот  $f_{oF_2}[M\Gamma п]$ 

Как видно из рис. 2д, на временном интервале 04:30 $\div$ 06:00 UT углы  $\theta$  между оптимальными трассами невелики и составляют  $0^{\circ} \div 5, 2^{\circ}$ . Небольшие углы доворота траектории с одного азимута на другой в 04:30÷06:00 UT делают возможным рефракционный механизм трансформации за счёт поперечных градиентов электронной концентрации. Об эффективности такого механизма свидетельствуют, в частности, результаты измерений угловых частотных характеристик верхнего луча (моды Педерсена), когда регулярные и локальные (связанные с перемещающимся ионосферным возмущением) градиенты электронной концентрации на трассе зондирования приводят к изменению азимута верхнего луча на  $5^{\circ} \div 6^{\circ}$  [17].

Мы полагаем, что трансформация сигналов с одной трассы на другую происходит в области сближения и пересечения оптимальных трасс. Поскольку углы между этими трассами малы, то области трансформации сигналов достаточно протяжённые; согласно расчётам они х среднеширотной ионосферы.

расположены в Северном и Южном полушариях среднеширотной ионосферы.

На рис. 4 в качестве примера показаны две оптимальные трассы, проходящие через Ростовна-Дону и Кипр, для 06:00 UT, когда угол  $\theta$  между этими трассами составляет 5,2°. На рис. 4 также приведены изолинии критических частот. Как видно из рис. 4, существуют две точки пересечения трасс: одна точка пересечения (1) с координатами 65° с. ш., 99° в. д. находится в дневной ионосфере, вторая точка (2) с координатами 65° ю. ш., 81° з. д. находится в ночной ионосфере. Согласно модели IRI-2007 в этих областях существуют поперечные градиенты критической частоты  $f_{0F_2}$  около 0,12 МГц/100 км и 0,05 МГц/100 км соответственно. Следует отметить, что в точках пересечения трасс градиент критической частоты  $f_{0F_2}$  направлен к экватору (см. рис. 4).

С учётом ориентации оптимальных трасс (см. рис. 4) и влияния направления градиента на изменение азимута сигнала (по данным [17] азимут верхнего луча смещается в направлении градиента) можно полагать, что градиенты частоты  $f_{0F_2}$  в точках пересечения способствуют

Как видно из рис.  $2\partial$ , на интервале времени  $06:00\div08:00$  UT угол  $\theta$  между оптимальными трассами увеличивается от 5,2° до 10,6°, т. е. в этом случае для трансформации сигнала требуются значительные углы доворота. Вполне вероятно, что при этом рефракции на градиентах электронной концентрации не достаточно, чтобы обеспечить «переход» сигнала с одной трассы на другую. Возможно, этим объясняется расхождение экспериментальных и расчётных азимутальных характеристик прямого кругосветного сигнала на временном интервале после 06:00 UT (см. рис.  $2\partial$ ).

Для определения механизмов распространения коротких радиоволи на кругосветной трассе Кипр-Ростов-на-Дону проводились траекторные расчёты и расчёты поглощения радиоволн методом характеристик по методике, изложенной в [19]. В расчётах использовалась модель ионосферы IRI-2007. Характерные примеры лучевых траекторий для различных частот и углов излучения во временном интервале прохождения прямого кругосветного сигнала показаны на рис. 5. Здесь же приведено распределение критических частот  $f_{0F_2}$  и  $f_{0E}$  и высоты максимума слоя  $h_{\rm mF_2}$  вдоль трассы распространения. Как видно из рис. 5, на трассе реализуется в основном комбинированный способ распространения прямого кругосветного сигнала, включая скачковое распространение, распространение в канале между слоями E и F и рикошетирующие траектории. Захват радиоволн в ионосферный волновод между слоями Е и F может осуществляться за счёт рефракции на отрицательном градиенте электронной концентрации в *F*-области и положительных градиентах электронной концентрации в E-слое и высоты максимума  $h_{{
m mF}_2}$  в F-области ионосферы. В волноводе сигнал распространяется выше основных поглощающих слоёв D и E ионосферы и при распространении на значительные расстояния  $(15 \div 25) \cdot 10^3$  км разность в потерях на поглощение между скачковыми и волноводными модами может, согласно расчётам, достигать 20÷30 дБ. Интересно отметить, что в расчётах наблюдается довольно редко встречающийся механизм распространения типа шепчущей галереи как в нижней ионосфере на высотах  $70 \div 100$  км (см. рис. 5, луч 3), так и в верхней ионосфере вблизи максимума F-слоя (см. рис. 5, луч 1). В нижней ионосфере механизм шепчущей галереи реализуется, как правило, после прохождения значительной части трассы в канале между слоями F и E при очень пологих, близким к скользящим, траекториям в окрестности Е-слоя.

Также расчёты показывают, что в середине временно́го интервала прохождения прямого кругосветного сигнала (05:00÷07:00 UT), когда составляемый трассой с терминатором угол  $\beta$  не превышал 30°, потери на поглощение примерно на 15÷20 дБ меньше, чем в 07:30 UT, когда угол  $\beta$ становится больше 40°.

На трассе Кипр—Ростов-на-Дону, наряду с прямыми кругосветными сигналами, наблюдались сигналы обратного эха. Частотно-временные интервалы прохождения сигналов обратного эха отличаются от аналогичных характеристик для прямых кругосветных сигналов. Так, в январе 2013 года сигналы обратного эха наблюдались в период с 05:00 до 06:00 UT, а в феврале 2013 года — с 04:30 до 06:00 UT, т. е. в заметно более узком временном интервале, чем прямые кругосветные сигналы. Диапазон частот сигналов обратного эха ( $f_{\rm HHY} \div f_{\rm MHY}$ ) уже, чем у прямых кругосветных сигналов.

На появляемость прямых кругосветных сигналов и сигналов обратного эха и их частотновременные характеристики влияют диаграммы направленности передающей и приёмной антенн



Рис. 5. Панель (a) — лучевые траектории прямого кругосветного сигнала на трассе Кипр—Ростовна-Дону в 06:00 UT 06.02.2013 с параметрами  $f = 11 \text{ МГц}, \Delta = 8^{\circ}$  (кривая 1),  $f = 14 \text{ МГц}, \Delta = 8^{\circ}$  (кривая 2),  $f = 20 \text{ МГц}, \Delta = 0^{\circ}$  (кривая 3),  $f = 20 \text{ МГц}, \Delta = 2^{\circ}$  (кривая 4). Панель (б) — критические частоты  $f_{0F_2}$  (кривая 1) и  $f_{0E}$  (кривая 2) вдоль трассы прямого кругосветного сигнала, панель (6) — высоты  $h_{mF_2}$  максимума электронной концентрации вдоль трассы прямого кругосветного сигнала

(для сигналов обратного эха излучение осуществляется в задний лепесток диаграммы передающей антенны), а также распределение электронной концентрации  $N_{\rm e}$  вдоль трассы распространения. Наличие или отсутствие продольных градиентов концентрации  $N_{\rm e}$  приводит к различным преобладающим механизмам распространения. Так, отрицательный градиент концентрации  $N_{\rm e}$  может приводить к захвату радиосигналов на рикошетирующие или волноводные траектории с более высокими предельными частотами по сравнению со скачковыми модами, обладающими меньшим поглощением. С другой стороны, для приёма рикошетирующих и волноводных мод требуются благоприятные условия для вывода радиоволн из канала, например, за счёт рассеяния или рефракции на положительном градиенте концентрации  $N_{\rm e}$ . При этом в случае рефракции радиоволн для попадания сигнала в приёмный пункт необходима фазировка лучей относительно области с подходящим градиентом концентрации. Кроме того, как видно из рис. 4, для сигналов обратного эха направление градиента в точках 1 и 2 не способствует трансформации сигнала с

А. А. Понятов, Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов и др.



Рис. 6. Прямые кругосветные сигналы на трассе Алис Спрингс (Австралия)—Ростов-на-Дону в 11:03 UT 25.11.2013. Обозначения такие же, как на рис. 1

одной оптимальной трассы на другую. Возможно, это является одной из причин плохого прохождения сигналов обратного эха после 06:00 UT, когда растёт угол между трассой Кипр—Ростов-на-Дону и терминатором и в то же время отсутствуют механизмы, обеспечивающие трансформацию сигнала с одной оптимальной трассы на другую.

Реальное пространственно-временно́е распределение концентрации  $N_{\rm e}$  вдоль трассы зондирования вместе с параметрами приёмо-передающих антенн и определяют в конечном итоге частотно-временны́е, амплитудно-частотные и угловые частотные характеристики прямых кругосветных сигналов и сигналов обратного эха, что подтверждается в эксперименте.

# 1.2. ТРАССЫ АЛИС СПРИНГС (АВСТРАЛИЯ)—РОСТОВ-НА-ДОНУ, АЛИС СПРИНГС (АВСТРАЛИЯ)—ЙОШКАР-ОЛА И ЛЕЙВЕРТОН (АВСТРАЛИЯ)—РОСТОВ-НА-ДОНУ

На трассе Алис Спрингс (Австралия, 22°58' ю. ш., 134°26' в. д.)—Ростов-на-Дону с протяжённостью 12 224 км в зимние месяцы (ноябрь–декабрь 2013 года) в период с 09:30 до 13:00 UT принимались прямые кругосветные сигналы с задержкой порядка 180÷181 мс. Пример ионограммы с приёмом таких сигналов с помощью ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора показан на рис. 6. Для типичного дня наблюдений 25.11.2013 на рис. 7 показан временной ход измеряемых характеристик прямого кругосветного сигнала (ДЧХ, АЧХ и УЧХ). В интервале времени 12:00÷13:00 UT передатчик в Австралии не работал. На рис. 7*a* показано изменение со временем угла  $\beta$  между трассой Алис Спрингс—Ростов-на-Дону и терминатором.

Для сравнения на рис. 8 показан временно́й ход диапазона частот прохождения прямого кругосветного сигнала (рис. 8*a*) и интервала его задержек (рис. 8*б*) на трассе Алис Спрингс—Йошкар-Ола. Сплошной линией на рис. 8*a* показан угол  $\beta$  между трассой и терминатором. Из рис. 8*a* видно, что сигнал наблюдается, когда угол  $\beta \approx 16,5^{\circ} \div 30^{\circ}$ , что соответствует аналогичным данным на трассе Алис Спрингс—Ростов-на-Дону (см. рис. 7*a*).

В период наиболее интенсивного прямого кругосветного сигнала на трассе Алис Спрингс— Ростов-на-Дону (примерно с 10:30 до 12:00 UT) границы диапазона его частот составляли примерно  $f_{\rm HHY} = 16\div18~{\rm MFr}$ ,  $f_{\rm MHY} = 25\div26~{\rm MFr}$ .

На трассе Алис Спрингс-Йошкар-Ола диапазон частот прохождения прямого кругосветного

А. А. Понятов, Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов и др.





Рис. 7. Временны́е характеристики прямого кругосветного сигнала на трассе Алис Спрингс— Ростов-на-Дону 25.11.2013. Обозначения такие же, как на рис. 2

сигнала  $f_{\rm HHY}$ :  $f_{\rm MHY}$  варьируется от максимальных значений 14,5÷23,2 МГц в 10:35÷10:50 UT до минимальных значений 18,0÷21,6 МГц в 12:00÷12:15 UT (см. рис. 8*a*).

А. А. Понятов, Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов и др.



Рис. 8. Временные характеристики прямого кругосветного сигнала на трассе Алис Спрингс (Австралия)—Йошкар-Ола 12.11.2013. Обозначения такие же, как на рис. 3

Максимальная амплитуда прямого кругосветного сигнала на трассе Алис Спрингс—Ростовна-Дону, наблюдаемая в 11:00÷11:40 UT, примерно на 20÷30 дБ превышала амплитуду сигнала в моменты его появления (09:30÷10:00 UT) и исчезновения (около 13:00 UT).

На основе измерений ослабления прямых (коэффициент ослабления  $A_{\rm nc}$ ) и прямых кругосветных ( $A_{\rm nkc}$ ) сигналов на трассе Австралия—Ростов-на-Дону были сделаны оценки потерь кругосветных сигналов  $A_{\rm kc} = A_{\rm nkc} - A_{\rm nc}$ . По нашим данным  $A_{\rm kc} \approx 25 \div 30$  дБ.

Диапазон задержек прямого кругосветного сигнала на трассе Алис Спрингс—Ростов-на-Дону варьируется от 179,5÷180,5 мс в 10:00 UT до 179,5÷182,0 мс в 11:50 UT, т. е. средняя задержка несколько увеличивается, что, по всей вероятности, связано с ростом частоты  $f_{\rm MHY}$  на этом временном интервале и частотной дисперсией сигнала.

На трассе Алис Спрингс—Йошкар-Ола диапазон задержек прямого кругосветного сигнала варьируется в небольших пределах 179,0÷180,4 мс (см. рис. 86).

Вертикальные углы прихода прямого кругосветного сигнала на трассе Алис Спрингс—Ростовна-Дону, в основном, лежат в интервале  $1^{\circ} \div 10^{\circ}$ , причём после 11:00 UT треки расслаиваются по углам прихода на 3–4 моды с разностью по углам между модами в  $2^{\circ} \div 3^{\circ}$  (см. рис. 6*6*). В интервале 11:00÷12:00 UT верхнее значение угла прихода возрастает до  $14^{\circ} \div 17^{\circ}$  (см. рис. 7*г*).

В отличие от прямого кругосветного сигнала на трассе Кипр—Ростов-на-Дону, азимутальные характеристики сигнала на трассе Алис Спрингс (Австралия)—Ростов-на-Дону заметно не меняются с течением времени. Азимут прямого кругосветного сигнала находится (за небольшим исключением) в пределах  $100^{\circ} \div 110^{\circ}$  практически во всём временном интервале прохождения сигнала, что в среднем совпадает с азимутальным углом прихода прямого сигнала  $\alpha = 107^{\circ}$  (показан на рис.  $7\partial$  пунктиром).

Чтобы выявить роль терминатора при распространении прямого кругосветного сигнала был рассчитан угол  $\beta$  между трассой Алис Спрингс—Ростов-на-Дону и вечерним терминатором (см. рис. 7*a*). Получено, что сигнал наблюдается в период 09:30÷13:00 UT, когда  $\beta \approx 21^{\circ}$ ÷35°. Наименьшее значение угла  $\beta \approx 21^{\circ}$  имеет место в 10:30 UT. Сигнал не наблюдается до 09:00 UT, когда  $\beta \geq 27^{\circ}$ , и после 13:00 UT, когда  $\beta \geq 40^{\circ}$ .

Интересно сравнить азимутальные характеристики прямого кругосветного сигнала для двух трасс с различной ориентацией и различной протяжённостью: Кипр—Ростов-на-Дону ( $D = 41\,460$  км) и Алис Спрингс—Ростов-на-Дону ( $D = 52\,220$  км). На трассе Алис Спрингс—Ростов-на-Дону средний азимут прихода прямого кругосветного сигнала практически не меняется во

время его прохождения и составляет  $\alpha \approx 100^{\circ} \div 110^{\circ}$ , что близко к азимуту прихода прямого сигнала из Австралии  $\alpha \approx 107^{\circ}$ .

На трассе Кипр—Ростов-на-Дону азимут прямого кругосветного сигнала увеличивается с течением времени. Мы предполагаем, что это связано с трансформацией сигнала с одной оптимальной трассы (относительно передатчика) на другую оптимальную трассу (относительно приёмника). Эти трассы составляют наименьшие углы с терминатором. Трансформация сигнала может осуществляться за счёт рефракции радиоволн на поперечных градиентах электронной концентрации в области сближения оптимальных трасс при небольших углах доворота. Согласно расчётам, небольшие углы доворота  $\theta \approx 0^{\circ} \div 5^{\circ}$  имеют место в период с 04:30 до 06:00 UT и в это время наблюдается хорошее совпадение экспериментальных и расчётных азимутов прямого кругосветного сигнала. Важно отметить, что изменение азимута на  $5^{\circ} \div 7^{\circ}$  экспериментально наблюдается для верхнего луча на меридиональной трассе Кипр—Ростов-на-Дону с протяжённостью 1 460 км в условиях регулярных и вызванных прохождением перемещающихся ионосферных возмущений локальных поперечных градиентов электронной концентрации на трассе зондирования [17].

Применим эту схему расчётов к результатам наблюдений прямого кругосветного сигнала на трассе Алис Спрингс—Ростов-на-Дону. Согласно расчётам, во временном интервале 09:30÷  $\div$ 12:00 UT угол между оптимальными трассами  $\theta \approx 17,5^{\circ} \div 33^{\circ}$  (см. рис. 7d, линия 3). При таких углах доворота в области пересечения двух трасс азимут угла прихода прямого кругосветного сигнала должен варьироваться в пределах от 95° в 09:30 UT до 124° в 11:30 UT (см. рис. 7d, линия 2), что не наблюдается в эксперименте. Напомним, что азимут прихода прямого кругосветного сигнала в среднем совпадает с азимутом прихода прямого сигнала на трассе Австралия—Ростовна-Дону ( $\alpha \approx 107^{\circ}$ ). Отсутствие в эксперименте изменений азимута прямого кругосветного сигнала указывает на то, что в данном случае доворота на большие углы 17,5°÷33° не происходит. Таким образом, можно сделать вывод, что если не принимать во внимание рассеяние на неоднородностях (трассы пересекаются в среднеширотной ионосфере, где неоднородная структура слабо развита), то рефракции радиоволн в области сближения трасс не хватает для доворота на такие большие углы. Другими словами, величина поперечных градиентов электронной концентрации недостаточна для реализации в регулярной ионосфере такой трансформации азимута угла прихода прямого кругосветного сигнала на трассе Алис Спрингс—Ростов-на-Дону.

По результатам наблюдений прямого кругосветного сигнала можно заключить, что оптимальность его распространения определяется как оптимальным направлением распространения со стороны передатчика (диаграмма направленности антенны и наименьшие потери при распространении), так и оптимальным направлением распространения со стороны приёмника. Если оба эти направления совпадают, то будут иметь место наилучшие условия для распространения прямого кругосветного сигнала. Если эти направления не совпадают, то к потерям при распространения добавятся потери при трансформации сигнала с одного направления на другое. Механизмом трансформации могут быть, например, механизмы рассеяния и/или рефракции на поперечных градиентах электронной концентрации. Таким образом, имеет место конкуренция эффектов распространения и трансформации сигнала, что и определяет характеристики прямого кругосветного кругосветного кругосветного кругосветного кругосветной концентрации.

На протяжённой трансэкваториальной трассе Лейвертон (Австралия, 26,63° ю. ш., 122,4° в. д.)—Ростов-на-Дону часто наблюдаются аномальные сигналы. Пример ионограммы с аномальными сигналами, полученной с помощью ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора на трассе Лейвертон—Ростов-на-Дону показан на рис. 9. Аномальные сигналы с задержками, превышающими задержку прямого сигнала и с азимутами, отличающимися от азимута прямого сигнала, отмечены маркерами PC1–PC5 (рассеянные сигналы). Сигналы, зарегистрированные на частотах 18,0÷25,5 МГц с чётко выраженной линейчатой модовой структурой с задержками меньше за-



Рис. 9. Характеристики сигналов на трассе ЛЧМ-зондирования Лейвертон (Австралия)—Ростов-на-Дону в 12:15 UT 16.11.2013. Панель (a) соответствует ДЧХ, панель (б) — АЧХ, панели (e) и (e) — УЧХ (угол места Δ и азимут α соответственно)

держки прямого сигнала, распространяющегося через F-область ионосферы, и с азимутом, совпадающим с азимутом прямого сигнала, отмечены маркером  $E_{\rm s}$ . Мы полагаем, что эти сигналы обусловлены распространением через спорадический слой  $E_{\rm s}$ . Маркером АС (аномальный сигнал) отмечен слабый сигнал на частотах  $28 \div$  $\div 30$  МГц, превышающих максимальную наблюдаемую частоту прямого сигнала (примерно 27 МГц), распространяющегося через F-область ионосферы. Азимут аномального сигнала совпадает с азимутом прямого сигнала, а его амплитуда на  $40 \div 50$  дБ меньше амплитуды прямого сигнала.

Чтобы позиционировать рассеянные сигналы



Рис. 10. Месторасположение областей, ответственных за рассеянные сигналы РС1–РС5 на трассе ЛЧМ-зондирования Лейвертон (Австралия)— Ростов-на-Дону в 12:15 UT 16.11.2013

PC1–PC5, мы промоделировали распространение радиоволн с учётом результатов измерений ДЧХ и УЧХ на трассе Лейвертон—Ростов-на-Дону. Результаты позиционирования нанесены на физическую карту и показаны на рис. 10.

Как видно из рис. 10, положение областей, позиционируемых с сигналами PC1, приходится на район в окрестности северной стенки ионосферного провала (южной границы аврорального овала). Мы предполагаем, что эти сигналы связаны с рассеянием на мелкомасштабных ионосферных неоднородностях, существующих в вечерние и ночные часы местного времени в этой области широт. Такие сигналы, приходящие с северо-восточного направления с азимутов около  $15^{\circ} \div 25^{\circ}$ , часто регистрируются на трассе Лейвертон—Ростов-на-Дону [6, 17]. Сигналу PC2 соответствует общирная область, простирающаяся через Индийский океан от Австралии до Африки. Возможно, что часть сигналов PC2 связана с рассеянием от водной поверхности. Этот вопрос требует дальнейших исследований в различных ионосферных и метеорологических условиях.

Из рис. 10 видно, что область формирования сигналов PC3, PC4 и PC5 приходится на Эфиопское нагорье, Апеннины и Рейнские горы соответственно, поэтому основной вклад в эти сигналы вносит рассеяние радиоволн от горных возвышенностей.

Что касается аномального сигнала, наблюдаемого на частотах выше максимальной наблюдаемой частоты основной моды, то согласно расчётам лучевых траекторий на начальном участке трассы (примерно до 6500 км) сигналы на этих частотах распространяются «рикошетом» без промежуточного отражения от Земли, а на участке трассы примерно с 8000 до 10500 км распространяются верхним лучом, что приводит к частотной дисперсии сигнала, характерной для верхнего луча, и заметному его ослаблению, связанному с утечкой радиоволн при скользящем распространении в окрестности максимума F-слоя [20].

### 1.3. ТРАССЫ ВИРДЖИНИЯ (США)—ЙОШКАР-ОЛА И ПУЭРТО-РИКО—ЙОШКАР-ОЛА

Если исследованию кругосветных сигналов уделяется значительное внимание на протяжении многих десятилетий, с первых обнаружений распространения кругосветных сигналов в середине 20-х годов XX века до настоящего времени, то особенности сверхдальнего распространения коротких радиоволн исследуются не так интенсивно. В определённой мере это связано со сложностью организации таких экспериментов и ограниченными техническими возможностями используемых средств. Здесь можно отметить только работу [21], где приведены результаты исследования распространения коротких волн на протяжённых трассах между исследовательским судном и Японией с помощью ЛЧМ-ионозонда, но нет анализа влияния ионосферной обстановки на характеристики принимаемых сигналов. Судно совершало рейс из Японии в Антарктиду, на борту судна находился ЛЧМ-передатчик с мощностью 100 Вт, приём ЛЧМ-сигналов осуществлялся в Хираисо (Hiraiso) в Японии. В ходе экспериментов, которые проводились в ноябре–декабре 1981 и 1982 годов расстояние между передатчиком и приёмником изменялось от 100 до 11 000 км.

В последние годы в связи с размещением в разных местах земного шара современной техники наклонного ЛЧМ-зондирования с привязкой аппаратуры к единому времени по сигналам GPS появилась возможность проведения таких наблюдений [6, 17].

В данной работе представлены первые результаты исследования распространения коротких радиоволн на трассах Вирджиния—Йошкар-Ола с протяжённостью 8344 км и Пуэрто-Рико—Йошкар-Ола с протяжённостью 9649 км. Измерения проводились в январе-феврале 2014 года. В качестве типичного примера на рис. 11 показан временной ход диапазона частот прохождения прямых сигналов на трассе Вирджиния—Йошкар-Ола. Здесь же приведён угол  $\beta$  между трассой и терминатором. В поле рисунка для временных интервалов прохождения коротковолновых сигналов приведено усреднённое отношение сигнал/шум. Согласно полученным данным на трассе Вирджиния—Йошкар-Ола можно выделить несколько временных интервалов, которые характеризуются различными диапазонами частот прохождения коротковолновых сигналов: 05:00÷07:00 UT ( $f_{\rm HH}$ ч = 7,4÷8,6 МГц,  $f_{\rm MH}$ ч = 10,3÷11,2 МГц); 11:40÷14:30 UT ( $f_{\rm HH}$ ч = 10,6÷12,8 МГц,  $f_{\rm MH}$ ч = 18,2÷ > 20,0 МГц); 15:00÷16:30 UT ( $f_{\rm HH}$ ч = 16,4÷16,7 МГц).

Заметим, что во временно́м интервале 11:40÷14:30 UT из-за сравнительно низкой верхней частоты зондирования ЛЧМ-передатчика в Вирджинии ( $f_{\rm max} = 20~{\rm M}\Gamma$ ц) не удаётся точно определить максимальную наблюдаемую частоту, которая превышает частоту  $f_{\rm max}$ . На рис. 11 это превышение указано стрелкой.

Согласно экспериментальным данным амплитуда сигнала во временном интервале 11:40÷ ÷14:30 UT на 10÷15 дБ и на 15÷20 дБ превышает амплитуду сигнала в интервалах 05:00÷



Рис. 11. Временны́е вариации диапазона частот  $f_{\rm HHY} \div f_{\rm MHY}$  прямого сигнала на трассе Вирджиния—Йошкар-Ола 01.02.2014 (вертикальные отрезки); превышение частотой  $f_{\rm MHY}$  верхней частоты зондирования указано стрелками. Кривая 1 соответствует углу  $\beta$  между трассой и терминатором. В поле рисунка для выделенных временны́х интервалов приведены усреднённые значения отношения сигнал/шум в дБ



Рис. 12. Временны́е вариации диапазона частот  $f_{\rm HH}$ ч÷  $f_{\rm MH}$ ч прямого сигнала на трассе Пуэрто-Рико—Йошкар-Ола 01.02.2014 (вертикальные отрезки); превышение частотой  $f_{\rm MH}$ ч верхней частоты зондирования указано стрелками. Кривая 1 соответствует углу  $\beta$  между трассой и терминатором. В поле рисунка для выделенных временны́х интервалов приведены усреднённые значения отношения сигнал/шум в дБ

÷07:00 UT, 15:00÷16:30 UT и 23:20÷23:30 UT соответственно. Таким образом, наилучшие условия распространения коротковолновых сигналов как по диапазону прохождения частот, так и по амплитуде сигнала имеют место в интервале 11:40÷14:30 UT.

Как видно из рис. 11, во временном интервале 11:40÷14:30 UT трасса составляет наименьший угол с терминатором  $13^{\circ}\div 25^{\circ}$ , в то время как в других интервалах угол  $\beta \geq 40^{\circ}\div 60^{\circ}$ . При этом в интервале 11:40÷14:30 UT радиоволны распространяются в освещённой ионосфере с примерно равномерным распределением электронной концентрации вдоль трассы. Это обеспечивает распространение на сравнительно высоких частотах с заметной амплитудой сигнала вследствие уменьшения потерь на поглощение. Напомним, что потери на поглощение Г обратно пропорциональны квадрату частоты f ( $\Gamma \propto 1/f^2$ ). В интервале 05:00÷07:00 UT практически вся трасса проходит в неосвещённой ионосфере с небольшими плазменными частотами. Поэтому в этом временном интервале диапазон частот прохождения коротковолновых сигналов сужается и смещается в область низких частот. При этом за счёт увеличения спектральной плотности помех снижается отношение сигнал/помеха. В других временны́х интервалах (15:00÷16:30 UT и 23:20÷23:30 UT) имеет место заметная неравномерность освещения трассы. Таки образом, неравномерная освещённость трассы в остальных интервалах по сравнению с интервалом 11:40÷14:30 UT приводит к заметному ухудшению прохождения коротких радиоволн на протяжённой трассе в этих временны́х интервалах.

На рис. 12 показан временной ход диапазона частот прохождения прямых сигналов на трассе Пуэрто-Рико-Йошкар-Ола. В поле рисунка для временны́х интервалов прохождения коротковолновых сигналов приведено усреднённое отношение сигнал/шум. Согласно полученным данным, на трассе Пуэрто-Рико-Йошкар-Ола аналогично трассе Вирджиния-Йошкар-Ола можно выделить несколько временны́х интервалов, которые характеризуются различными диапазонами частот прохождения сигналов: 00:00÷03:00 UT ( $f_{\rm HHY} = 4,4\div5,3$  МГц,  $f_{\rm MHY} = 7,0\div7,3$  МГц); 04:30÷06:15 UT ( $f_{\rm HHY} = 4,7\div5,4$  МГц,  $f_{\rm MHY} = 7,1\div10,2$  МГц); 10:50÷14:15 UT ( $f_{\rm HHY} = 12,7\div16,0$  МГц,  $f_{\rm MHY} = 17,0\div > 20,0$  МГц).

Заметим, что во временно́м интервале 10:50÷14:15 UT из-за сравнительно низкой верхней частоты зондирования ЛЧМ-передатчика в Пуэрто-Рико ( $f_{\rm max} = 20~{\rm M}$ Гц) не удаётся определить максимальную наблюдаемую частоту, которая превышает частоту  $f_{\rm max}$ . На рис. 12 это превыше-



Рис. 13. Суточное прохождение сверхдальних и кругосветных сигналов на трассе Виржиния— Йошкар-Ола 01.02.2014 (*a*), трассе Пуэрто-Рико—Йошкар-Ола 01.02.2014 (*б*), трассе Алис Спрингс— Йошкар-Ола 12.11.2013 (*в*) и трассе Кипр—Йошкар-Ола 22.01.2013 (*г*). Кривые *1* соответствуют углу  $\beta$  между трассой и терминатором. Вертикальные отрезки — диапазоны частот  $f_{\rm HHY} \div f_{\rm MHY}$ прохождения сверхдальних (*a*, *б*) и прямых кругосветных (*b*, *c*) сигналов

ние указано стрелкой.

Согласно экспериментальным данным, амплитуда сигнала во временном интервале 10:50÷ ÷14:15 UT на 3÷5 дБ превышает амплитуду сигнала в остальных интервалах. Таким образом, наилучшие условия распространения коротковолновых сигналов как по диапазону прохождения частот, так и по амплитуде сигнала имеют место в интервале 10:50÷14:15 UT.

Как видно из рис. 12, во временном интервале  $10:50\div14:15$  UT трасса составляет наименьший угол с терминатором  $(15^\circ\div40^\circ)$ , в то время как в других интервалах угол  $\beta \ge 50^\circ\div60^\circ$ . При этом в указанном интервале радиоволны распространяются в освещённой ионосфере с примерно равномерным распределением электронной концентрации вдоль трассы. Это обеспечивает распространение на сравнительно высоких частотах с заметной амплитудой сигнала вследствие уменьшения потерь на поглощение. В других интервалах практически вся трасса проходит в неосвещённой ионосфере с небольшими плазменными частотами, поэтому диапазон частот прохождения сигналов сужается и смещается в область низких частот. При этом за счёт увеличения спектральной плотности помех снижается отношение сигнал/помеха.

Отметим, что во временном интервале 04:00÷08:00 UT бо́льшая часть трасс Вирджиния— Йошкар-Ола и Пуэрто-Рико—Йошкар-Ола проходила в неосвещённой ионосфере и небольшие по интенсивности рентгеновские вспышки, имевшие место в это время 1 февраля, не оказывали влияния на характеристики принимаемых сигналов.

Близость трасс Вирджиния—Йошкар-Ола и Пуэрто-Рико—Йошкар-Ола по протяжённости и ориентации, а также схожие параметры используемого оборудования в передающих пунктах определяют близкие характеристики принимаемых коротковолновых сигналов.

На рис. 13 приведены объединённые зависимости диапазона частот прохождения коротковол-

А. А. Понятов, Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов и др.

новых сигналов от полного времени суток для различных трасс для приёмного пункта Йошкар-Ола. Эти зависимости наглядно демонстрируют влияние ориентации трасс сверхдальнего и кругосветного распространения относительно терминатора. Из рис. 13 видно, что для всех трасс наилучшие условия распространения коротковолновых сигналов по диапазону частот и по амплитуде сигнала имеют место тогда, когда трассы составляют с терминатором небольшие углы:  $12^{\circ} \div 25^{\circ}$  для Кипра,  $16.5^{\circ} \div 30^{\circ}$  для Алис Спрингс,  $15^{\circ} \div 40^{\circ}$  для Пуэрто-Рико и  $13^{\circ} \div 25^{\circ}$  для Вирджинии. Полученные данные подтверждают, что как для кругосветного, так и для сверхдальнего распространения оптимальными являются трассы, составляющие небольшой угол  $\beta$  с терминатором ( $\beta \approx 10^{\circ} \div 30^{\circ}$ ). С увеличением угла  $\beta$  неравномерность освещения трассы сказывается на прохождении не только кругосветных сигналов, но и сигналов на трассах с протяжённостью  $8000 \div 15000$  км. Но, в отличие от кругосветных трасс, распространение на сверхдальних трассах имеет место и при значительных углах  $\beta \approx 40^{\circ} \div 60^{\circ}$ , но с заметно меньшей амплитудой сигнала. При этом с увеличением протяжённости трассы и приближением её к кругосветной трассе, сужается временной интервал прохождения коротковолновых сигналов, что в первую очередь связано с увеличением потерь при распространении в неблагоприятных условиях на значительной части трассы.

Следует отметить, что на сверхдальних и кругосветных трассах в ряде случаев могут складываться благоприятные условия для захвата/выхода радиоволн из ионосферных волновых каналов за счёт рассеяния на интенсивных мелкомасштабных неоднородностях естественного или искусственного происхождения и/или рефракции на регулярных или случайных (спорадический слой  $E_s$ , перемещающиеся ионосферные возмущения) крупномасштабных градиентах электронной концентрации. При этом частотно-временные характеристики сигналов могут отличаться от тех, которые следует ожидать при оптимальных условиях сверхдальнего распространения, когда трасса проходит вблизи терминатора.

С уменьшением длины трассы с переходом к односкачковому распространению на дальностях, не превышающих 4 000 км, условия распространения коротких радиоволн определяются в первую очередь ионосферными параметрами в средней точке трассы (контролируются суточным ходом критической частоты ионосферы  $f_{0F_2}$  в этой точке) и не «привязаны» к терминатору.

### выводы

Выполнены наблюдения прямых кругосветных сигналов на трассах Кипр—Ростов-на-Дону, Алис Спрингс (Австралия)—Ростов-на-Дону и Кипр—Йошкар-Ола, Алис Спрингс—Йошкар-Ола с помощью ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора и модернизированного ЛЧМ-ионозонда.

Определены частотно-временные интервалы прохождения прямых кругосветных сигналов, их амплитудно-частотные и угловые частотные характеристики.

Предложен механизм распространения и трансформации кругосветных сигналов за счёт рефракции радиоволн на поперечных градиентах электронной концентрации в области сближения двух оптимальных трасс, проходящих через передатчик и приёмник, каждая из которых составляет наименьший угол с терминатором. Показано, что предложенный механизм хорошо согласуется с экспериментально наблюдаемыми эффектами изменения азимута прямого кругосветного сигнала на трассе Кипр—Ростов-на-Дону и с отсутствием изменения азимута сигнала на трассе Алис Спрингс (Австралия)—Ростов-на-Дону.

По результатам наблюдений прямых кругосветных сигналов сделан вывод, что оптимальные условия распространения таких сигналов определяются как оптимальным направлением распространения со стороны передатчика (диаграмма направленности антенны и наименьшие потери при распространении), так и оптимальным направлением распространения со стороны

А. А. Понятов, Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов и др.

приёмника. Если оба эти направления совпадают, то будут иметь место наилучшие условия для распространения прямых кругосветных сигналов. Если эти направления не совпадают, то нужно учитывать потери, вызванные тем или иным механизмом трансформации сигнала с одного направления на другое. Например, это могут быть механизмы рассеяния и/или рефракции на поперечных градиентах электронной концентрации. Таким образом, имеет место конкуренция эффектов распространения и трансформации сигнала, что и определяет характеристики прямых кругосветных сигналов в различных ионосферных условиях.

На основе экспериментальных и расчётных данных кругосветного распространения коротких радиоволн можно сделать вывод, что оптимальными для кругосветных сигналов являются трассы, составляющие небольшие углы с терминатором  $\beta \approx 10^{\circ} \div 25^{\circ}$ .

При этом распределение электронной концентрации вдоль трассы остаётся достаточно однородным, чтобы поддерживать распространение на сравнительно высоких частотах, но в то же время существуют градиенты ионизации, обеспечивающие захват радиоволн на рикошетирующие и волноводные траектории. Таким образом, создаются благоприятные условия для комбинированного механизма распространения с меньшими потерями по сравнению с распространением только скачковыми модами.

Определены механизмы распространения аномальных сигналов на трассе Лейвертон (Австралия)—Ростов-на-Дону и показано, что часть сигналов обусловлена рассеянием радиоволн от горных возвышенностей Африки и Европы, а часть — рассеянием от ионосферных неоднородностей высокоширотной ионосферы северного полушария.

Показано, что на трассах сверхдальнего зондирования Вирджиния (США)—Йошкар-Ола, Пуэрто-Рико—Йошкар-Ола с протяжённостью 8000÷10000 км наилучшие условия распространения имеют место, когда вся трасса проходит в освещённой ионосфере вблизи границы с терминатором, составляя с ним небольшой угол 10°÷25°.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 12-02-00177-а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Гуревич А.В., Цедилина Е.Е. Сверхдальнее распространение коротких радиоволн. М.: Наука, 1979. 248 с.
- Uryadov V. P., Ryabova N. V., Ivanov V. A., Shumaev V. V. // J. Atm. Terr. Phys. 1995. V. 57, No. 11. P. 1263.
- Fenwick R. B. Round-the-world high frequency propagation: Techn. Rep. No. 71 of Radioscience Lab. Stanford University. Stanford, 1963.
- 4. Голян С. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 9. С. 1 370.
- 5. Гуревич А. В., Ерухимов Л. М., Ким В. Ю. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 9. С. 1 305.
- Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградова Е. Г., Понятов А. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 3. С. 176.
- 7. Бубнов В. А., Румянцев Г. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 9. С. 1383.
- Пат. № 2399062 РФ. Ионосферный зонд-радиопеленгатор. / Г.Г. Вертоградов, В.П. Урядов, В. Г. Вертоградов, С. В. Кубатко. Опубл. 10.09.2010. Бюл. № 25.
- The United States and Australia memorandum of agreement on radar activities. Data fusion project arrangement: Techn. doc. № 3043. Final report. Space and Naval Warfare Systems Center, 1998. 183 p.

- Pace P. E. Detecting and classifying low probability of intercept radar. Artech House Inc., 2009. 849 p.
- 11. The Akrotiri military antennae health survey: Final report. Department of Medical Physics and Oncology University of Bristol, 2005. 78 p.
- Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 4. С. 267.
- 13. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г. и др. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2010. Т. 15, № 5. С. 22.
- 14. Колчев А.А., Шумаев В.В., Щирый А.О. // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 12. С. 73.
- 15. Колчев А. А., Шумаев В. В., Чернов А. Г. и др. // Труды XVI Международной научно-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC'2010), Воронеж, 2010. Т. 2. С. 797.
- 16. sec.noaa.gov.
- Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 5. С. 287.
- 18. Сажин В. И., Тинин М. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 9. С. 1 389.
- 19. Понятов А.А., Урядов В.П. Компьютерное моделирование ионосферного распространения коротких радиоволи: Препринт № 428 НИРФИ. Нижний Новгород, 1996. 20 с.
- 20. Тинин М.В. // Исследования по геомаг. аэрономии и физике Солнца. М.: Наука, 1973. Вып. 29. С. 157.
- 21. Ichinose M., Kuratani Y., Yamazaki I. // J. Radio Res. Lab. 1985. V. 32, No. 136. P. 61.

Поступила в редакцию 20 февраля 2013 г.; принята в печать 1 апреля 2014 г.

## FEATURES OF SUPER-LONG-DISTANCE AND ROUND-THE-WORLD PROPAGATION OF HF WAVES

A. A. Ponyatov, G. G. Vertogradov, V. P. Uryadov, E. G. Vertogradova, V. V. Shumaev, A. G. Chernov, and E. G. Chaika

We present the results of the experimental studies of the features of super-long-distance and roundthe-world propagation of HF waves in the radio lines with different orientation and length, which were obtained in 2012–2014 using a new technology of oblique ionospheric sounding. The frequencytime travel intervals of the direct round-the-world signals, their amplitude–frequency and angularfrequency characteristics are determined. The mechanism of propagation and transformation of the round-the-world signals due to the radio-wave refraction by the transverse electron-density gradients in the region of approach of two optimal paths passing via the transmitter and receiver so that each path forms the smallest angle with the terminator. It is shown that the proposed mechanism is in good agreement with the experimentally observed variation of the azimuth of the direct round-theworld signal on the Cyprus–Rostov-on-Don path and the Alice Springs (Australia)–Rostov-on-Don path in the absence of variation of the direct round-the-world signal azimuth. For the super-longdistance propagation of HF waves on the Virginia (USA–Yoshkar-Ola and Puerto Rico–Yoshkar-Ola (the distances about 8000–10000 km) paths, the best propagation conditions are observed when the entire path is in the illuminated ionosphere near the terminator boundary making a small angle of  $10^{\circ}-25^{\circ}$  with the terminator.