

УДК 550.388.2/621.371

ВАРИАНТ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ КОРОТКОВОЛНОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

© 2013 г. В. Ф. Иванов, Т. О. Мысливцев, Б. В. Троицкий

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

e-mail: vf_ivanov@list.ru, tim33@list.ru, borya.troitsky@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.03.2011 г.

После доработки 20.09.2011 г.

В работе обсуждаются возможности метода траекторных расчетов при решении задачи местопределения источников КВ радиоизлучения. Зависимость электронной концентрации от координат задается моделью SPIM, корректируемой ионосферным индексом солнечной активности, который задается по картам полного электронного содержания. Предложен вариант построения региональной карты полного электронного содержания по данным измерений сигналов навигационных систем ГЛОНАСС/GPS. Показано, что метод траекторных расчетов в совокупности с корректируемой моделью ионосферы повышает точность местопределения источников КВ радиоизлучения.

DOI: 10.7868/S0016794013020065

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача определения координат источников радиоизлучения (далее источников) имеет большую историю, а публикации — большую библиографию. Так или иначе эта задача решалась, но растущие требования по точности, особенно на дальностях в несколько тысяч километров, по-прежнему возвращают к ней внимание.

Условно эту задачу можно разделить на три части:

1-я часть техническая, связанная с обнаружением, идентификацией сигнала, а также с измерением его частоты и амплитудно-фазовых характеристик;

2-я часть — обработка измерений с целью определения углов прихода, поляризации и доплеровского сдвига частоты;

3-я часть — методическая, включающая алгоритм расчета координат источников по измеренным углам прихода.

Усовершенствование, касающееся именно этой, третьей, части задачи местопределения источников, составляет предмет данной работы.

Многочисленные измерения углов прихода КВ сигналов от известных (реперных) источников показали, что они на фоне медленных суточных изменений ионосферы флуктуируют с временным масштабом от 5 до 10 мин, испытывая иногда значительные вариации в единицы градусов по азимуту и десятки — по углу места в зависимости от протяженности трассы. Естественно, что флуктуации углов прихода связывались с эффектом рассеяния радиоволн на неоднородностях ионосферы, что, вообще говоря, справедли-

во при одномодовом распространении. Однако в большинстве ситуаций работы радиосистем КВ диапазона наблюдается многомодовое распространение (в лучевой трактовке — это волны, пришедшие по разным траекториям) и, следовательно, флуктуации могут быть результатом интерференции нескольких мод, что было подтверждено применением управляемых узконаправленных приемных антенн. На протяженных радиолиниях ($D > 1000$ – 1500 км) многолучевость является в основном результатом прихода волн, отразившихся от различных уровней ионосферы (моды E и F) и пришедших разным количеством скачков. На малых дальностях интерферируют магнитоионные компоненты и волны, отраженные зеркально, но имеющие при одном скачке разные углы места из-за присутствия в ионосфере средне- и крупномасштабных неоднородностей электронной плотности.

Если сигнал принят и углы прихода измерены, то дальше работает методика определения координат источника, которая по возможности должна учитывать состояние ионосферы — первопричины всех вариаций характеристик распространяющихся радиоволн. В случае так называемого однотоочечного (однопозиционного) местопределения известны частота (f), азимут (α) и зенитный угол (φ) принятой волны, т.е. необходимо по заданным f и φ определить дальность скачка (D). Если имеется ионозонд в месте приема, то в предположении отсутствия в ионосфере горизонтальных градиентов электронной концентрации можно воспользоваться соотношением Брайта–Тьюва, из которого следует $D = 2z_{д.верт}(f \cos \varphi) \operatorname{tg} \varphi$. Значе-

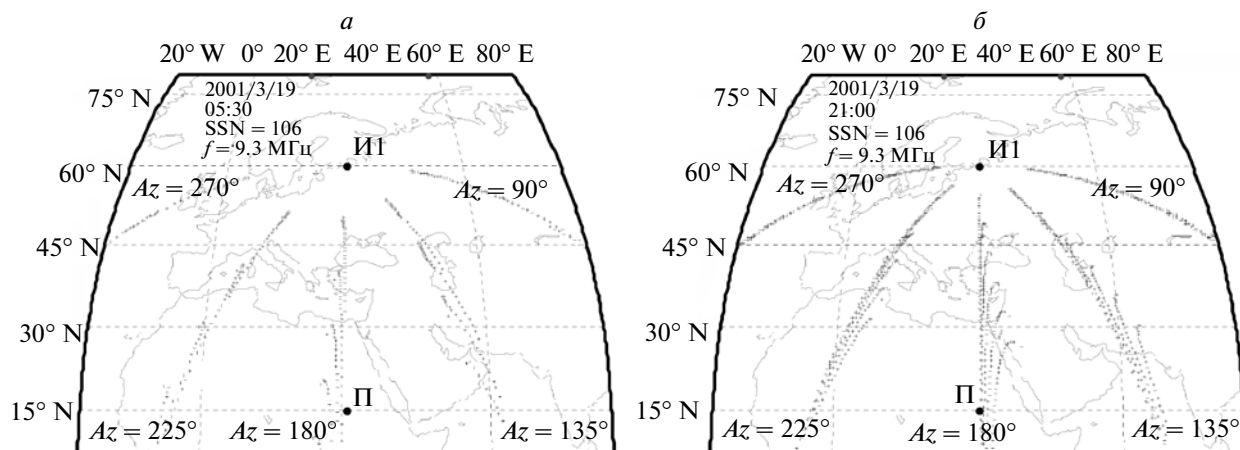


Рис. 1. Точки прихода на Землю траекторий, рассчитанных из пункта И1. *a* – ЛТ = 5:30; *б* – ЛТ = 21:00.

ние $z_{\text{д.верт}}$ снимается с ионограммы на частоте $f_{\text{верт}} = f \cos \varphi$.

Далее, рассчитывая дугу большого круга в направлении α длиной D , определяют координаты источника. Однако, эта простая процедура допускает слишком много возможностей для погрешностей. Кроме неточности определения углов прихода (особенно в плоскости падения) влияют наличие горизонтальной неоднородности ионосферы, которая отклоняет радиоволны, неопределенность по количеству скачков и многолучевость.

Неопределенность по скачкам снимается при измерении α и φ в двух или более наземных пунктах. В этом случае координаты точки пересечения дуг большого круга отождествляются с координатами источника. Методика хорошо работает при отсутствии или малости горизонтальных градиентов электронной концентрации ионосферы, когда величина ошибки местоопределения удовлетворяет пользователя. В противном случае нужна методика, учитывающая состояние ионосферы, которая всегда неоднородна и нестационарна, в особенности при высокой солнечной активности. Для решения этой задачи широкое применение нашел метод траекторных расчетов, который, однако, требует ионосферного обеспечения в виде модели, которая должна адекватно отражать текущее состояние ионосферы вдоль трассы распространения.

2. ТРАЕКТОРНЫЕ РАСЧЕТЫ

Выбрав в качестве ионосферного обеспечения модель SPIM (*Standard Plasmasphere – Ionosphere Model*) [Gulyaeva et al., 2002], нижняя часть которой представляет собой Международную справочную модель IRI, оценим роль горизонтальных градиентов ионосферы в задаче местоопределе-

ния при многолучевом распространении КВ сигнала. Для простоты траектории радиоволн рассчитывались без учета поглощения и магнитного поля Земли [Троицкий, 1983]. Следует отметить, что разнообразие возможных вариантов для расчетов чрезвычайно велико, поскольку ситуация зависит от модели ионосферы, т.е. от времени суток, сезона и уровня солнечной активности, а также от координат наземных пунктов, направлений распространения и рабочей частоты.

Зададим следующие начальные условия: рабочая частота $f = 9.3$ МГц, координаты выхода лучей (60° N, 30° E), азимут от 90° до 270° с шагом 45° , а угол места изменяется от 5° до 70° с шагом 0.2° . На рисунке 1а показаны точки прихода на Землю траекторий радиоволн, распространяющихся через ионосферу, описываемую моделью SPIM, для ЛТ = 05:30, 19 марта 2001 г. и с индексом солнечной активности Sunspot Number (далее по тексту SSN) равным 106, а на рис. 1б – то же самое, но для ЛТ = 21:00. Используемые в тексте статьи значения индекса солнечной активности доступны в сети Интернет, например, по ссылке <http://www.swpc.noaa.gov/ftppdir/indices>.

Из приведенных рисунков видно, что на дальность ~ 4 тыс. км приходят лучи за 2–5 скачков (моды $2F$ – $5F$). Отметим, что в эксперименте [Бочаров и др., 1992] на трассе Иркутск–Николаев уверенно разделялись по углу падения моды от $2F$ до $6F$.

Как следует из рисунков, в восточном и западном направлениях боковые отклонения малы, но дальность скачков больше при распространении в неосвещенную область ионосферы. В южном секторе направлений заметны боковые отклонения, обусловленные действием восходно-заходных градиентов электронной плотности, а величина отклонений зависит не только от состояния ионосферы (время суток, сезон, солнечная актив-

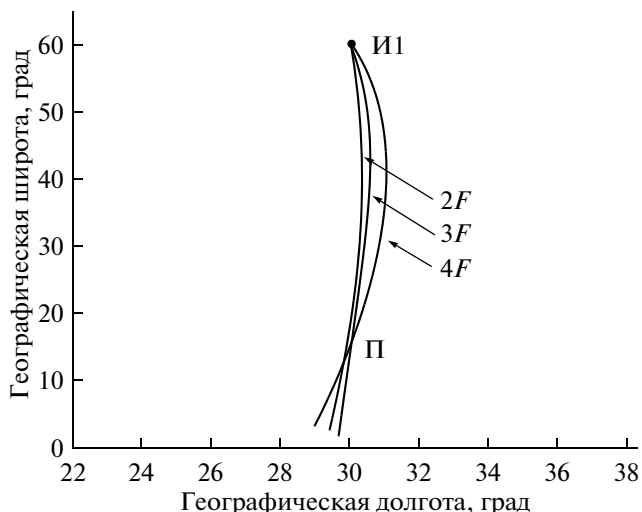


Рис. 2. Проекция траекторий радиоволн на поверхность Земли при многомодовом распространении.

ность), но и от рабочей частоты, ориентации трассы и количества скачков на ее длине.

Если выбрать координаты пункта, например, 15° N, 30° E (точка П на рис. 1а), а затем рассчитывать положения точек прихода, уменьшая азимут от 180°, то через эти координаты последовательно пройдут “треки” мод 2F, 3F и 4F. Таким образом, определяются три пары углов α и φ в пункте И1 (для данного варианта начальных условий это: $\alpha_{2F} = 178.8^\circ$; $\varphi_{2F} = 5.3^\circ$; $\alpha_{3F} = 177.7^\circ$; $\varphi_{3F} = 14.8^\circ$; $\alpha_{4F} = 175.7^\circ$; $\varphi_{4F} = 23.2^\circ$). Вышедшие под этими углами траектории соберутся в точке П (см. рис. 2). Это означает, что разделение мод в условиях мно-

голучевости (определение α и φ каждой моды) и расчет траекторий волн, распространяющихся через ионосферу, позволяет найти координаты источника, принимая сигнал в одном пункте. При этом снимается неоднозначность однопозиционного местоопределения из-за неизвестного количества скачков. Если судить по густоте точек прихода, то на трассе И1-П преобладающей по амплитуде будет мода 4F, если, правда, не учитывать поглощение.

Расчет треков из двух пунктов (СПб и Москва) с “мгновенными” значениями азимутов приводит к сложной картине пересечения мод, которая демонстрируется на рис. 3. Выбранные значения параметров составляли: дата 19.03.2001 г., LT = 05:30, SSN = 100 (рис. 3а) и SSN = 50 (рис. 3б), $f = 9.3$ МГц, $\alpha_{СПб} = 216.098^\circ$, $\alpha_{М} = 229.11^\circ$. Из рисунка 3а видно, что “треки” пересекаются в пяти точках (A, B, C, D и E). Изображенная на рис. 3а точка O получена в результате расчетов координат источника по формулам сферической тригонометрии с теми же значениями азимутов. Точка A (пересечение треков нижних лучей) ближе других расположена к точке O, но “передатчик” может находиться и в других точках, поскольку за счет фокусировки вблизи “мертвой зоны” амплитуда поля может быть больше, например, в точке B, чем в A. Таким образом, сигнал может быть многолучевым, и необходимо разделение мод по азимуту и оценка амплитуды каждой моды. При изменении параметров модели ионосферы координаты точек пересечения тоже будут меняться.

Так, уменьшение SSN вдвое (рис. 3б) дает случай одномодового распространения радиоволн и, как следствие, повышение точности местоопре-

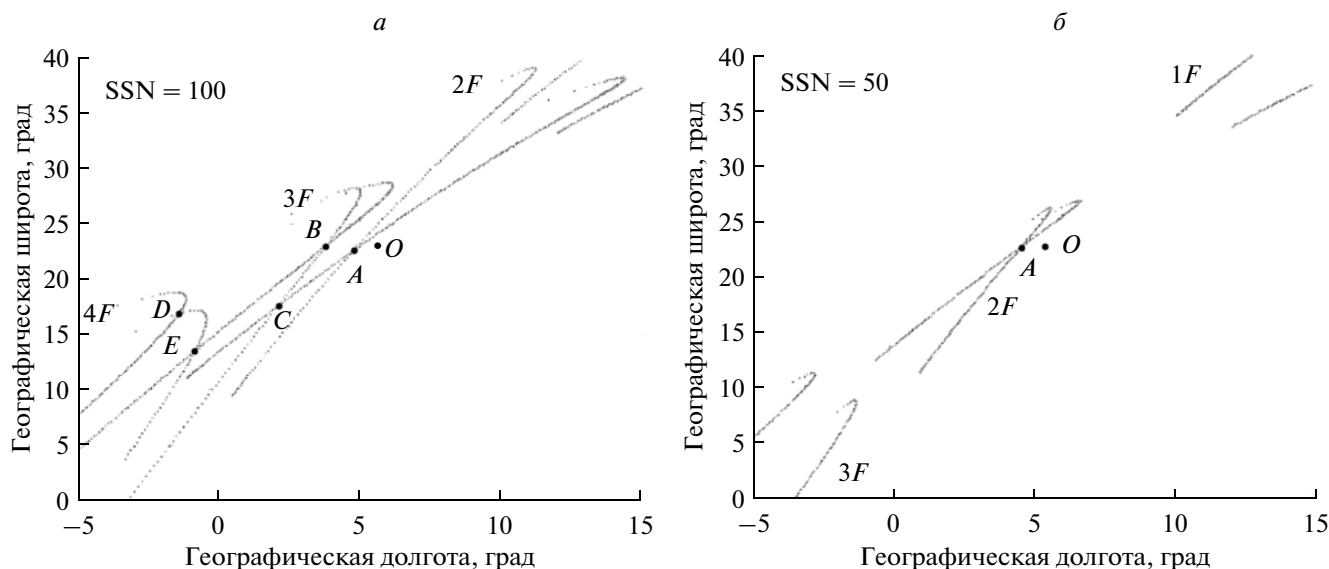


Рис. 3. Область пересечения треков, образованных точками прихода лучей, рассчитанных из двух разнесенных пунктов. а – SSN = 100; б – SSN = 50.

деления источника. Очевидна важность влияния неточности задания SSN. Отклонения текущих значений SSN от прогнозируемых среднемесячных могут достигать десятков процентов. Отсюда следует, что применяемая в траекторных расчетах ионосферная модель должна адаптироваться к реальным условиям. В работе [Троицкий и др., 2007] описан способ коррекции модели IRI с использованием региональных карт полного электронного содержания (ПЭС) путем определения ионосферного индекса солнечной активности. Способ может использоваться и для коррекции модели SPIM в условиях возмущенной ионосферы, а его оперативность определяется быстротой получения региональной карты ПЭС, что уже возможно в “почти реальном” времени.

3. ВАРИАНТ ИОНОСФЕРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Двухчастотная навигационная аппаратура потребителей навигационных систем ГЛОНАСС/GPS, принимающая сигнал на двух когерентных частотах и формирующая измерения дальности и фазового набега, позволяет вычислить величину, непосредственно определяющую ПЭС вдоль трассы распространения сигнала, используя обобщенное выражение

$$I = I_0 - C = k(R_1 - R_2),$$

где I_0 – абсолютное значение ПЭС вдоль трассы распространения навигационного сигнала; C – погрешность, обусловленная групповым временем запаздывания широкополосных навигационных сигналов в аппаратуре потребителя и передатчике навигационного космического аппарата (НКА), либо неразрешенной неоднозначностью фазовых измерений; $k = \pm \frac{1}{40.3} \frac{f_1^2 f_2^2}{(f_2^2 - f_1^2)}$, знак

плюс для дальномерных измерений, минус – для фазовых; $R_{1,2}$ – измерения дальности или фазового набега на разных частотах.

Вычисленные значения I являются основой для построения региональной карты ПЭС, отражающей реальное состояние ионосферы. Для построения карты требуется адаптация коэффициентов заданной региональной модели ПЭС по массиву значений I , накопленных на некотором промежутке времени. Сделать это можно минимизируя функционал относительно неизвестных коэффициентов и погрешности C :

$$U(a_1, a_2, \dots, a_m, C_1, \dots, C_M) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N [F(E_{ji}) I_{ji}(a_1, a_2, \dots, a_m) + C_j - I_{ji}]^2,$$

где M – количество НКА на интервале наблюдения; N – количество измерений, накопленное на интервале наблюдения, по каждому НКА; j – соответствует номеру НКА; i – номер измерения j -го НКА; $F(E)$ – функция наклона; $I(a_1, a_2, \dots, a_m)$ – модель вертикального ПЭС (относительно неизвестных коэффициентов).

Для моделирования вертикального ПЭС может использоваться n -мерная пространственная полиномиальная функция степени m

$$P_m = P_m(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i_1+i_2+\dots+i_n \leq m} a_{i_1 i_2 \dots i_n} x_1^{i_1} x_2^{i_2} \dots x_n^{i_n},$$

где m – степень полинома; n – размерность пространства; a – независимые коэффициенты.

Достоинство полиномиальной аппроксимации состоит в том, что решаемая обратная задача (по результатам наблюдения вычисляются коэффициенты функции) является линейной. В регионе радиусом ~ 1000 км на малых интервалах времени (1–2 ч) для описания фонового ПЭС и его горизонтальных градиентов достаточны первая и вторая степень полинома, что подтверждается практическими исследованиями. В двумерном случае (геомагнитная широта, долгота во вращающейся системе координат) аппроксимирующие полиномы первой и второй степени будут иметь вид

$$I(\lambda_{cr}, \varphi) = a_0 + a_1 \lambda_{cr} + a_2 \varphi;$$

$$I(\lambda_{cr}, \varphi) = a_0 + a_1 \lambda_{cr} + a_2 \varphi + a_3 \lambda_{cr}^2 + a_4 \varphi^2 + a_5 \lambda_{cr} \varphi,$$

где λ_{cr} – долгота во вращающейся системе координат; φ – геомагнитная широта.

Пример карты ПЭС, построенной по модели первой степени по результатам обработки навигационных измерений на 5:00 18.06.2005 г. приведен на рис. 4.

При наличии измерительных данных от сети станций (например, IGS – *International GNSS Service*), позволяющих охватить большой по масштабам географический регион, можно использовать более высокие степени полинома или другие наиболее подходящие аппроксимирующие функции. Стоит отметить, что одним из результатов работы сети IGS являются планетарные карты ПЭС, рассчитываемые с интервалом 2 ч, но первичные данные сети IGS становятся доступными только через несколько часов, а результаты их обработки в виде карт ПЭС – через сутки.

4. СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДИК МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения азимутов прихода радиоволн от передатчика с координатами (37°45' N, 126°30' E) на

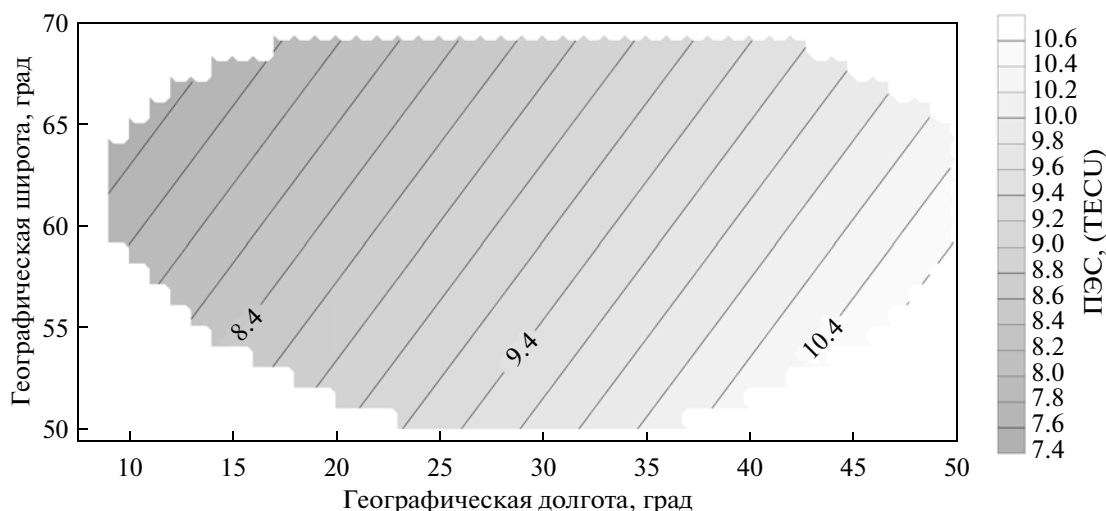


Рис. 4. Карта ПЭС, построенная с использованием модели первой степени.

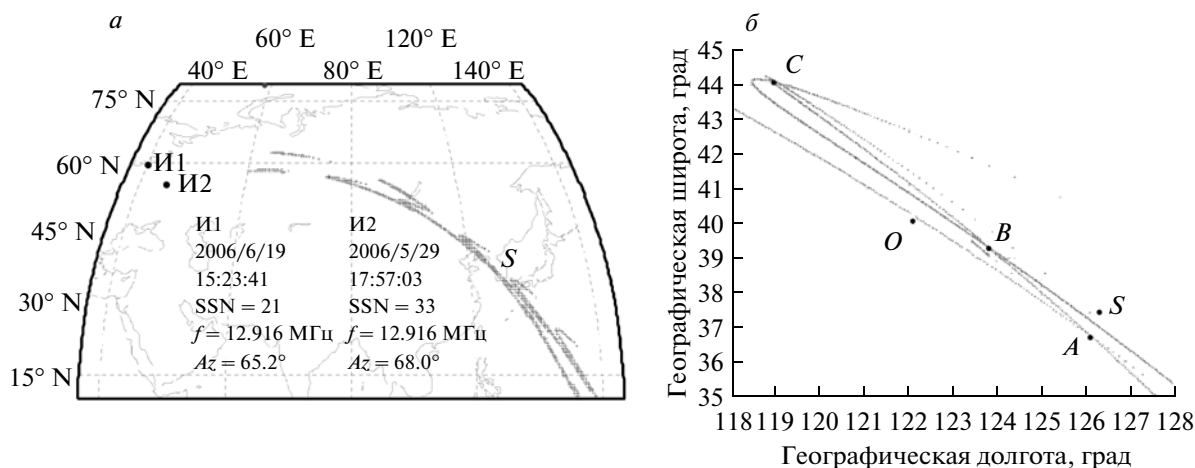


Рис. 5. а – определение координат источника радиоизлучения по данным измерения азимутов в двух пунктах (И1, И2); б – область пересечения “треков” вблизи источника радиоизлучения.

частоте 12.916 МГц проведены в Москве 29.05.2006 г. с результатом $\alpha_1 = 67.2^\circ$ в LT = 16:32; $\alpha_2 = 67.8^\circ$ в LT = 16:48; $\alpha_3 = 67.5^\circ$ в LT = 17:08 и $\alpha_4 = 68.0^\circ$ в LT = 17:57, а также в Санкт-Петербурге 19.06.2006 г. с результатом $\alpha_1 = 64.4^\circ$ в LT = 12:51; $\alpha_2 = 60.4^\circ$ в LT = 13:00; $\alpha_3 = 63.6^\circ$ в LT = 13:25; $\alpha_4 = 63.6^\circ$ в LT = 14:28; $\alpha_5 = 61.2^\circ$ в LT = 14:42 и $\alpha_6 = 65.2^\circ$ в LT = 15:23.

Если бы измерения углов были точны, а ионосфера описана адекватно, то проекции всех траекторий сходились бы в одной точке. Однако, в реальности из-за ошибок измерений, многолучевости и неточности задания ионосферы наблюдается значительный разброс определяемых координат источника. Следует отметить, что истинные азимуты на передатчик ($\alpha_M = 66.9^\circ$ и $\alpha_{СП6} = 63.6^\circ$) близки друг к другу, поэтому малые

ошибки при измерении углов входящих волн будут приводить к значительным погрешностям результатов местоопределения.

На основе представленных данных были выполнены расчеты координат источника в трех вариантах: 1) по формулам сферической тригонометрии; 2) методом траекторных расчетов с моделью SPIM и прогнозным значением индекса солнечной активности SSN = 8; 3) то же самое, но со значением SSN = 33 на 29.05.2006 г. и SSN = 21 на 19.06.2006 г. (сглаженные за месяц величины SSN, взятые из архива http://www.swpc.noaa.gov/ftplib/indices/old_indices/2006_DSD.txt на соответствующие даты). В качестве меры точности используется усредненное значение дальностей по поверхности земного эллипсоида от истинной точки расположения источника радиоизлучения до точки пересечения треков, полученных

методом траекторных расчетов. Если использовать все без исключения данные, средние значения ошибок по дальности составляют соответственно 1628, 1415 и 1035 км, что уже свидетельствует о преимуществе метода траекторных расчетов, но ошибки все-таки велики (~25–15% от дальности). Анализ карт ПЭС показал наличие слабого широтного градиента в ионосфере поперек трасс распространения, что должно приводить к увеличению азимутов прихода волн по сравнению с истинными. Кроме того, сомнительны данные α_3 и α_4 (Санкт-Петербург) из-за их совпадения с истинным азимутом источника. Если оставить для расчета лишь значения α_1 и α_6 (Санкт-Петербург), то средние значения ошибок составляют соответственно: 493, 467 и 319 км (~8–5% от дальности). Рисунок 5а демонстрирует треки, образуемые точками прихода лучей на Землю для азимута α_4 (Москва) и α_6 (Санкт-Петербург), а рис. 5б – область пересечений “треков” вблизи источника. Можно заметить, что пересекаются моды $3F$ и $4F$ в точке A и $4F$ – в точках B и C . Если пренебречь лучом Педерсена и учесть, что мода $3F$ слаба, если судить по густоте точек, то с местоположением источника нужно отождествлять точку B . Видно, что она расположена ближе к точке S (истинное место расположения источника излучения), чем точка O (расчет с использованием формул сферической тригонометрии).

Очевидно, что использование метода траекторных расчетов и коррекция модели по индексу солнечной активности повышают точность местоопределения источника по сравнению с методиками, не учитывающими наличие ионосферы или ее горизонтальные градиенты.

5. ВЫВОДЫ

1. Определять координаты источников следует методом траекторных расчетов, который оправ-

дан физически, хотя и требует больших временных затрат по сравнению с методикой, использующей формулы сферической тригонометрии. Вариант метода, рассмотренный в статье, допускает усовершенствование путем учета анизотропии ионосферы и оценки амплитуды отраженных волн.

2. При многомодовом распространении радиоволн (особенно на трассах в несколько тысяч километров) необходимо разделение принятых волн как по углу места (φ), так и по азимуту (α). Расчет траекторий из одного пункта по выделенным параметрам (α , φ) дает их сходимости в одной точке, что свидетельствует о возможности однопозиционного местоопределения в условиях многолучевости.

3. Для повышения точности местоопределения с использованием метода траекторных расчетов необходима коррекция ионосферной модели (ее адаптация на реальные геофизические условия), например, по данным обработки сигналов навигационных систем ГЛОНАСС/GPS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бочаров В.И., Денисов А.М., Постоев Ю.К., Троицкий Б.В., Туматов К.И. Об эффективности ионосферного обеспечения КВ-трасс // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 32. № 1. С. 100–103. 1992.
- Троицкий Б.В., Ортиков М.Ю., Лобанов К.А., Власов А.А., Погорельцев А.И. Ионосферное обеспечение коротковолновой радиосвязи с использованием карт полного электронного содержания // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 47. № 3. С. 389–394. 2007.
- Троицкий Б.В. Отклик сигнала радиозондирования на ионосферные неоднородности. Алма-Ата: Наука. 164 с. 1983.
- Gulyaeva T.L., Huang X., Reinisch B.W. The Ionosphere-plasmasphere model software for ISO // Acta Geod. Geophys. Hu. V. 39. № 3. P. 143–152. 2002.