

**В. А. Кабанов, Г. М. Моргун, В. Б. Синицкий, И. С. Тургенев**

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины*

*12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*

E-mail: [vs@ire.kharkov.ua](mailto:vs@ire.kharkov.ua)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРОПОСФЕРНОЙ РЕФРАКЦИИ В ЗОНЕ ТЕНИ ПО ИЗЛУЧЕНИЮ УДАЛЕННОГО ИСТОЧНИКА

### Часть 2. Эксперимент

Оперативная оценка тропосферной рефракции является актуальной задачей, необходимой для повышения эффективности работы радиотехнических систем. В статье представлены результаты экспериментальных исследований тропосферной рефракции над морем по сигналам спутников навигационной системы *GPS*. Особенностью работы является использование зоны тени, в которой характеристики сигналов наиболее изменчивы и чувствительны к вариациям рефракции. Для усиления сигналов *GPS* в области тени применена параболическая антенна. В экспериментах, использующих радиозаходы спутников *GPS* над морем, наблюдаются реализации сигналов, соответствующие стандартной, повышенной рефракции и волноводному распространению. По экспериментальным данным восстанавливаются градиенты высотного профиля коэффициента преломления  $n(h)$  приводного слоя тропосферы, вычисленные в соответствии с разработанной моделью по углу радиозахода и крутизне дифракционного участка множителя ослабления. Они сравниваются с эффективными градиентами, восстановленными по уровням сигналов на приводной загоризонтной трассе. Коэффициенты корреляции массивов градиентов, определяемых по данным на приводной и спутниковых трассах, по отсчетам в близких сеансах составляют  $\sim 0,53 \dots 0,78$ , при усреднении данных возрастают до  $0,85 \dots 0,9$ . Результаты экспериментов могут быть использованы при разработке систем спутниковой диагностики тропосферной рефракции. Ил. 6. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

**Ключевые слова:** тропосферная рефракция, зона тени, спутник, угол рефракции, эффективный градиент.

В проблеме диагностики условий распространения радиоволн СВЧ важное место принадлежит тропосферной рефракции, в значительной мере определяющей дальность действия и качество работы радиотехнических систем. Для исследований рефракции применяются дистанционные методы, в том числе использующие излучение навигационных искусственных спутников Земли (ИСЗ), например, *GPS* или ГЛОНАСС.

Традиционное направление в задачах диагностики атмосферной рефракции по сигналам ИСЗ – восстановление высотного профиля приведенного коэффициента преломления  $N(h) = 10^6(n-1)$  или его градиента  $g_N = dN/dh$  может использовать различные методы: по фазовым [1] или доплеровским [2] измерениям, по интерференционным лепесткам [3] и др. Как правило, в этих методах используется излучение спутника в освещенной зоне. Однако известно [4], что в максимальной мере эффекты тропосферной рефракции проявляются при нахождении источника вблизи горизонта и в зоне тени, соответствующей области дальнего тропосферного распространения (ДТР).

Целью данной работы является исследование возможности восстановления градиента коэффициента преломления приводного слоя тропосферы в соответствии с параметрической моделью [5], с использованием экспериментально измеренных характеристик сигналов *GPS* в области тени, а также сопоставление полученных результатов с данными независимых рефракционных измерений на приводной трассе.

**1. Методика проведения экспериментов, аппаратура.** В работе сравниваются определяемые разными методами рефракционные характеристики приводного слоя атмосферы:

– градиенты коэффициента преломления, восстанавливаемые по сигналам спутников *GPS* (соответственно по углу радиозахода ( $P3$ )  $\alpha_{P3} - g_{N(P3)}$  и по крутизне  $S$  характеристики  $P3 - g_{N(S)}$  [5]);

– «эффективный» градиент  $g_{N\Omega}$ , восстанавливаемый по измерениям уровней сигналов на приводной трассе [6].

Радиофизические эксперименты по изучению тропосферной рефракции над морем выполнены в северо-восточной части Крымского полуострова в 2002–2003 гг. в течение трех серий измерений: июль и сентябрь 2002 г. (по 12 дней), апрель 2003 г. (5 дней). Эксперименты включали прием сигналов *GPS*, заходящих за горизонт, прием прямого сигнала на стационарной приводной загоризонтной трассе и психрометрические измерения приземного коэффициента преломления. Использовались также данные двух гидрометеоцентров, расположенных на удалениях 8 и 50 км. В эти же периоды проведены эксперименты, описанные в работах [7, 8].

Для регистрации уровня сигнала выбранного ИСЗ *GPS* при его заходе в функции времени  $U_{дБ}(t)$  использовались одночастотные приемники типа *ACE-III*, оснащенные антенной типа *Bullett-III*. Штатной аппаратурой обеспечивается сравнительно малое отношение сигнал/шум  $\sim 20 \dots 25$  дБ, которое соответствует области полутени и неглу-

бокой тени. Особенностью опытов, описываемых в данной работе, является использование имеющейся параболической антенны диаметром 3 м для получения характеристик сигналов GPS в области более глубокой геометрической тени. Это дало некоторое приращение уровня сигнала (около 15 дБ, рис. 1).

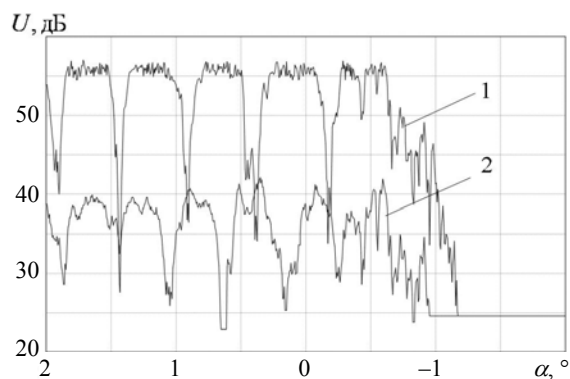


Рис. 1. Радиозаход спутника GPS, зарегистрированный одновременно приемниками: с параболической антенной – 1; со штатной антенной – 2

На рисунке в относительной логарифмической шкале (условные единицы AMU фирмы Trimble) представлены временные зависимости уровня сигнала  $U_{дБ}(t)$  заходящего спутника GPS, записанные приемниками с параболической и штатной антеннами. Видно насыщение сигнала в максимумах интерференционных лепестков. Антенна имела в диапазоне L1 GPS ( $f \cong 1,5$  ГГц) ширину диаграммы направленности около  $4^\circ$  и с помощью поворотной платформы устанавливалась в направлении, соответствующем расчетному азимуту точки захода спутника.

В процессе первоначальной обработки временные реализации сигнала  $U_{дБ}(t)$  с помощью эфемерид преобразуются в  $V_{дБ}(\alpha)$  – угломестные зависимости множителя ослабления  $V_{дБ}$  от истинного угла места спутника  $\alpha$ . Минимальный (пороговый) уровень множителя ослабления характеристики  $V(\alpha)$ , на котором отсчитывается угол радиозахода  $\alpha_{рз}$  [5], соответствующий окончанию сигнала, в схеме с параболической антенной составляет  $V_{рз} = -32 \pm 1$  дБ.

В дополнение к опытам, выполненным с штатными антеннами и представленным в работах [7, 8], с параболической антенной в разные сезоны проведено около 200 опытов.

На приводной (стационарной) трассе в качестве сопоставительной рефракционной характеристики используется эффективный градиент  $g_{НЭ}$ , восстанавливаемый по данным измерений уровней сигналов по методу В. Н. Троицкого [6].

Для экспериментов оборудована измерительная загоризонтная (ЗГ) приводная трасса протяженностью  $R = 60$  км, на которой установлена аппаратура с рабочей частотой  $f = 1$  ГГц [8]. Измеряемым параметром на трассе является множитель ослабления  $V_{ЗГ}$ . Параметры трассы выбраны таким образом, чтобы при стандартных условиях распространения множитель ослабления был около  $V_{ЗГ} \sim -45$  дБ (что соответствует уровню принимаемого сигнала, близкому к шумовому порогу), а при повышении градиента увеличивался примерно до  $V_{ЗГ} \sim 0$  дБ и более.

**2. Результаты экспериментов и их обсуждение.** Радиозаходам спутников GPS, заходящих над морем, свойственно разнообразие характеристик и сильная изменчивость во времени (рис. 2).

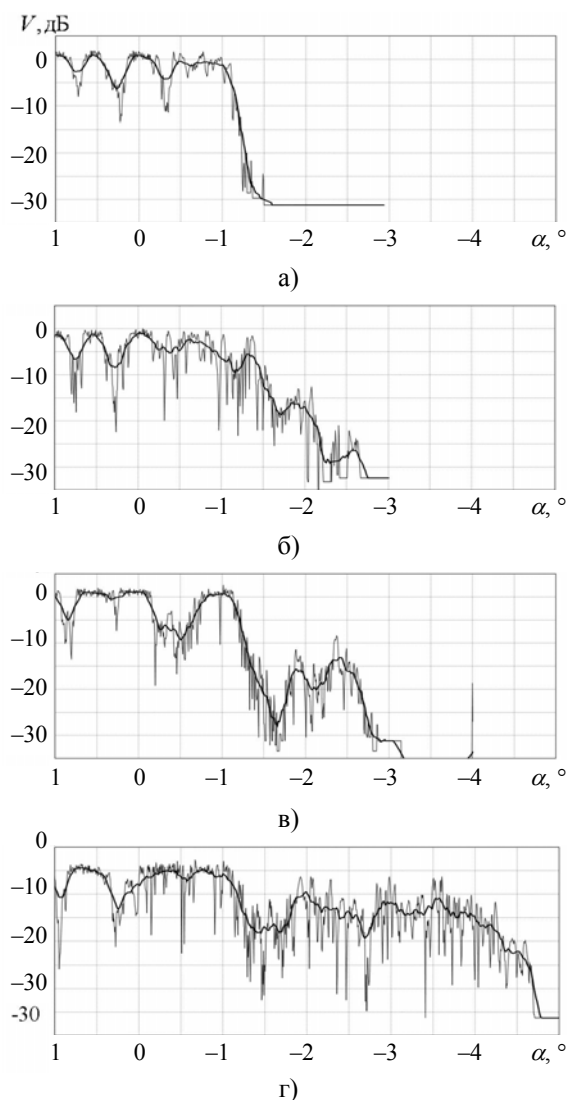


Рис. 2. Реализации радиозаходов GPS в различных условиях: а) – нормальный («стандартный») заход; б) – г) – «аномальные» заходы; тонкая линия – исходная зависимость, жирная – скользящее усреднение на интервале 15'

Они отличаются протяженностью реализаций (которая в первом приближении характеризуется угловым положением точки радиозахода), крутизной спада множителя ослабления в зоне тени и наличием различного вида флуктуаций, что связано с разными проявлениями эффектов тропосферной рефракции.

Наблюдается качественное соответствие типов радиозаходов *GPS* значениям эффективных градиентов  $g_{NЭ}$ , определяемых по уровням сигналов на приводной трассе.

Реализациям, радиозаход в которых заканчивается плавным экспоненциальным (почти линейным в логарифмическом масштабе) спадом сигнала, без дополнительных всплесков и флуктуаций, соответствуют стандартные или слегка повышенные значения эффективных градиентов  $g_{NЭ}$ . Например, во время типичных для такой ситуации радиозаходов, когда реализации сигналов ИСЗ имеют вид, подобный изображенному на рис. 2, а, на приводной трассе наблюдается устойчивый слабый сигнал на уровне  $V_{ЗГ} \cong -40$  дБ, что соответствует эффективному градиенту, близкому к стандартному значению  $g_{NЭ} = -0,04$  N-ед./м.

Другие типы опытов, характеризующиеся наличием флуктуаций повышенной интенсивности, свидетельствуют в общем случае о присутствии также других механизмов распространения. Так, радиозаходу, изображенному на рис. 2, г, типичному для условий волноводного распространения, сопутствует запись сигнала на приводной трассе с множителем ослабления  $V_{ЗГ} \approx 0$  дБ и интенсивными флуктуациями, размахом  $\sim 10...20$  дБ. В промежуточных случаях (рис. 2, б, в) уровень сигнала и интенсивность флуктуаций на приводной трассе также занимают промежуточное положение.

Приведенные примеры характеристик  $V(\alpha)$  при радиозаходах *GPS* в области геометрической тени качественно подобны дистанционным зависимостям множителя ослабления  $V(R)$ , полученным на внутритропосферных загоризонтных трассах ДТР [9, 10], что указывает на возможность их непосредственного использования для диагностики условий распространения радиоволн при соответствующей замене переменных.

Для обработки использовались реализации радиозаходов *GPS*  $V(\alpha)$ , предварительно сглаженные по методу скользящего среднего в окне 30 с, соответствующего с учетом угловой скорости захода спутника примерно  $15'$  (жирная линия на рис. 2). Интервал усреднения подбирался из компромисса между фильтрацией случайных тропосферных флуктуаций и отсутствием

искажения наклона дифракционного участка. Угол радиозахода  $\alpha_{PЗ}$  определялся для каждой реализации, а крутизна наклона участка радиозахода  $S = dV/d\alpha$  – для тех реализаций, где среди флуктуаций можно выделить дифракционный участок. Подбор наилучшего соответствия модельной (экспоненциальной) зависимости к экспериментальному участку радиозахода осуществлялся по методу наименьших квадратов.

На приводной трассе брались отсчеты множителя ослабления  $V_{ЗГ}$ , близкие к моментам радиозаходов *GPS*, усредненные на 10...15 мин интервалах.

Найденные значения  $\alpha_{PЗ}$  и  $S$ , а также измеренные на приводной трассе уровни сигналов  $V_{ЗГ}$  использовались для восстановления градиентов  $g_{N(PЗ)}$ ,  $g_{N(S)}$  и  $g_{NЭ}$  в соответствии с расчетными кривыми, показанными на рис. 3.

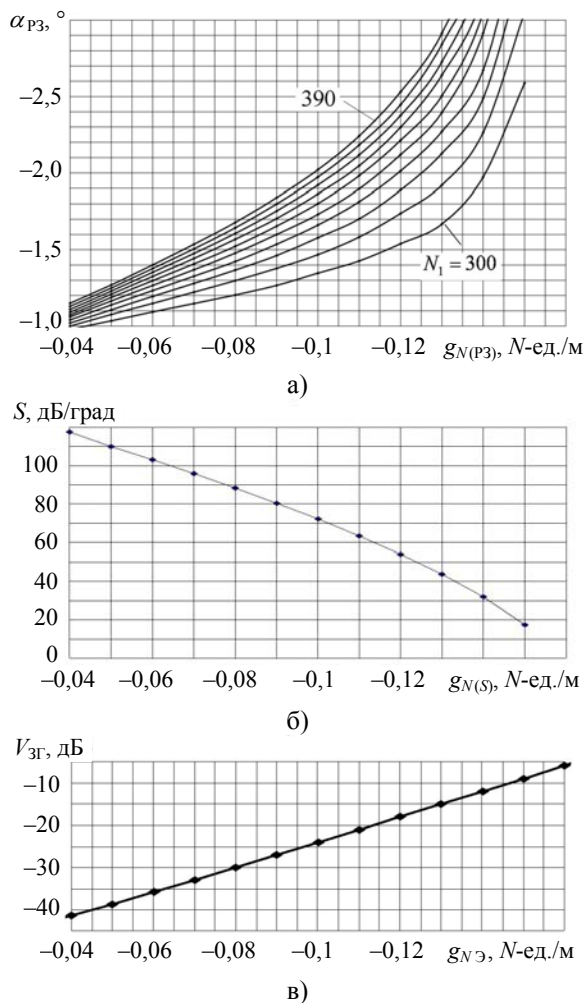


Рис. 3. Расчетные рефракционные характеристики: а) – зависимость угла радиозахода  $\alpha_{PЗ}$  от  $g_{N(PЗ)}$  и  $N_1$  для  $V_{PЗ} = -32$  дБ; б) – связь крутизны  $S$  дифракционной характеристики с градиентом  $g_{N(S)}$ ; в) – зависимость множителя ослабления  $V_{ЗГ}$  на приводной трассе от эффективного градиента  $g_{NЭ}$

На первых двух графиках изображены характеристики для спутниковых трасс: рассчитанные по модели [5] связь угла радиозахода  $\alpha_{P3}$  с градиентом  $g_{N(P3)}$  и приземным значением коэффициента преломления  $N_1$ , для порогового значения множителя ослабления  $V_{P3} = -32$  дБ (рис. 3, а) и зависимость крутизны характеристики радиозахода  $S$  от градиента  $g_{N(S)}$  (рис. 3, б). На рис. 3, в показана характеристика, рассчитанная для приводной трассы с параметрами  $R = 60$  км и  $f = 1$  ГГц, связывающая множитель ослабления  $V_{3Г}$  с эффективным градиентом  $g_{NЭ}$ , в соответствии с моделью [6].

Ниже представлены результаты обработки опытов двух более продолжительных серий измерений: июль и сентябрь 2002 г.

Непосредственное сопоставление градиентов, восстановленных разными методами, показано на диаграммах рассеяния (рис. 4, 5). На рис. 4 представлены зависимости, связывающие градиенты  $g_{NЭ}$ , восстановленные на при-

водной трассе, с градиентами  $g_{N(P3)}$ , построенными по углу радиозахода  $\alpha_{P3}$  и приземному коэффициенту преломления  $N_1$ . Аналогичные характеристики для градиентов  $g_{N(S)}$ , восстановленных по крутизне  $S$ , показаны на рис. 5. Точки на рисунках построены по данным отдельных опытов, их разброс вызван рядом причин радиофизического и методического характера: различие зон Френеля для приводной и спутниковых трасс, их разная протяженность и пространственное разнесение (десятки – сотни километров), а также временные флуктуации сигналов. Реальные условия, в которых проведены эксперименты, отличаются от принятых при моделировании, где среда предполагалась сферически-стратифицированной, без горизонтальных неоднородностей. Флуктуации сигналов, вызванные неоднородной структурой коэффициента преломления в приводном слое и близостью береговой черты, проявляются в снижении коэффициента корреляции измеряемых параметров.

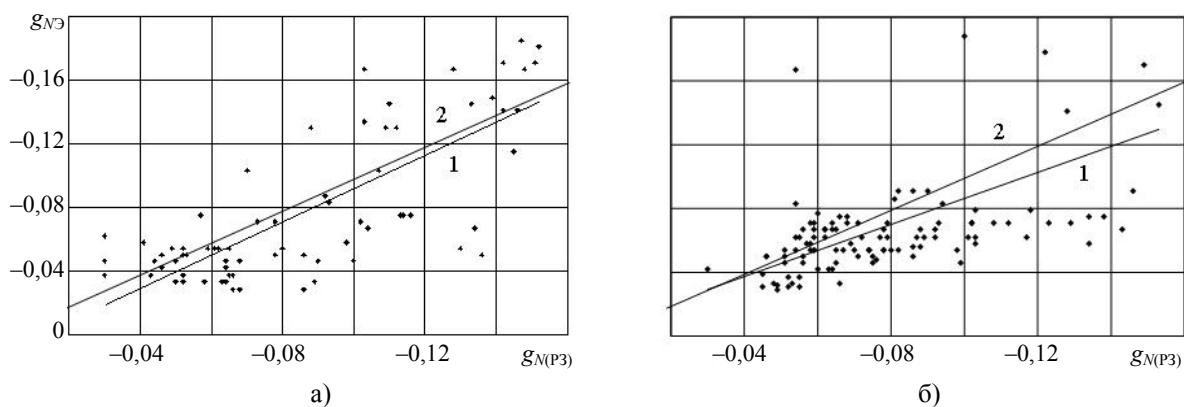


Рис. 4. Сопоставление градиентов  $g_{N(P3)}$ , восстановленных по углу радиозахода спутников GPS, с градиентами  $g_{NЭ}$ : а) – июль; б) – сентябрь 2002 г; 1 – линии регрессии, 2 – линии равных градиентов

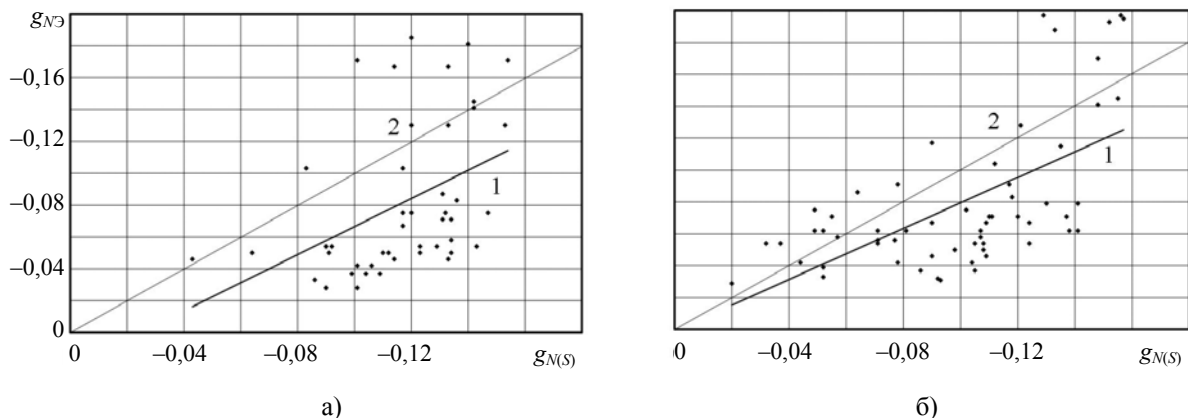


Рис. 5. Сопоставление градиентов  $g_{N(S)}$ , восстановленных по крутизне характеристики радиозахода спутников GPS, с градиентами  $g_{NЭ}$ : а) – июль; б) – сентябрь; 1 – линии регрессии, 2 – линии равных градиентов

Коэффициенты корреляции, а также коэффициенты  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  линий регрессии  $g_{NЭ} =$

$= a_1 + b_1 g_{N(ПЗ)}$  (для рис. 4) и  $g_{NЭ} = a_2 + b_2 g_{N(S)}$  (для рис. 5) представлены в таблице.

Статистические характеристики градиентов, измеренных на приводной и спутниковых трассах

Характеристики	Параметр	Июль 2002 г.	Сентябрь 2002 г.
Коэффициенты корреляции	По углу радиозахода	0,7803	0,607
	По крутизне дифракционного участка	0,531	0,616
Коэффициенты линий регрессии	По углу радиозахода	$a_1 = 0,0126$ $b_1 = 1,0472$	$a_1 = -0,0047$ $b_1 = 0,8157$
	По крутизне дифракционного участка	$a_2 = 0,0217$ $b_2 = 0,8824$	$a_2 = 0,0006$ $b_2 = 0,8005$

На рис. 4 и 5, б линии регрессии 1 близки линиям равных градиентов 2. На рис. 5, а положение линий 1 и 2 отличается, т. е. заметно превышение градиентов (примерно в 1,5 раза), восстановленных по крутизне характеристики радиозахода, над градиентами  $g_{NЭ}$ , которые определяются по уровням сигналов на загоризонтной трассе (точки смещены вправо). Коэффициент корреляции в этом случае снижен ( $k = 0,531$ ). Возможно, это связано с влиянием флуктуаций, маскирующих крутизну дифракционного участка. В ряде случаев (при градиентах, близких к критическим и при сильных флуктуациях сигнала) выделение на реализации дифракционного участка и определение его крутизны затруднительно. В связи с этим можно отметить некоторое преимущество определения градиента коэффициента преломления по углу радиозахода  $GPS$  по сравнению с определением его по крутизне дифракционного участка множителя ослабления.

В заключение приведем временные ряды углов радиозахода  $\alpha_{PЗ}$  и восстановленных по ним градиентов  $g_{N(ПЗ)}$  в сопоставлении с эффективными градиентами  $g_{NЭ}$  для июльской (рис. 6, а, в, д) и сентябрьской (рис. 6, б, г, е) серий экспериментов. Точками обозначены значения в отдельных опытах, сплошные линии соответствуют усредненным зависимостям  $\alpha_{PЗ}$ ,  $g_{N(ПЗ)}$  и  $g_{NЭ}$ , сглаженным по методу скользящего среднего на эквивалентном временном интервале  $\sim 12$  ч. Коэффициенты корреляции для сглаженных характеристик возрастают примерно до 0,85...0,9. На рисунках заметна повторяемость кривых, соответствующая переходам рефракции в приводном слое в различные состояния – из стандартного в сверхкритическое и наоборот. Подобные характеристики получены и для сравнительно непродолжительной апрельской серии измерений 2003 г.

В кривых, относящихся к июльской серии, в период повышенной рефракции (19–23 июля) на

всех рисунках виден суточный ход. Детальный анализ показывает, что максимумы градиентов приходятся на ночное время, а минимумы – на послеполуденное. В сентябрьской серии этот эффект менее выражен. Кроме того, в данной серии на участках до 23 сентября и после 26 сентября заметно превышение градиентов, восстановленных из спутниковых данных (рис. 6, г), по сравнению с градиентами, полученными на приводной трассе (рис. 6, е). Это может быть обусловлено, по-видимому, спецификой изменения приземного коэффициента преломления  $N_1$ .

Причины наблюдаемых вариаций рефракционных свойств приводного слоя известны [9]. Они заключаются в смене параметров тропосферы – температуры, давления, влажности, а также направления ветра. Последний фактор способствует переносу воздушных масс и формированию инверсий в профиле коэффициента преломления. При обработке вышеприведенных данных замечено, что в разные сезоны повышение рефракции связано с изменением направления ветра в разные стороны. Так, в июльской и сентябрьской сериях переход рефракции от стандартной к критической на приводной и спутниковых трассах обусловлен изменением направления ветра с сухопутного на морское [8], что могло приблизить к зоне, существенной для распространения, высокоградиентные слои, сформировавшиеся в открытом море.

В апрельской серии наблюдалась обратная картина – градиенты резко повысились после изменения направления ветра с морского на сухопутное, что привело к переносу воздушных масс с теплой суши на холодное море и, как следствие, к образованию инверсий температуры и коэффициента преломления.

Результаты проведенных экспериментов могут быть использованы при разработке систем спутниковой диагностики тропосферной рефракции.

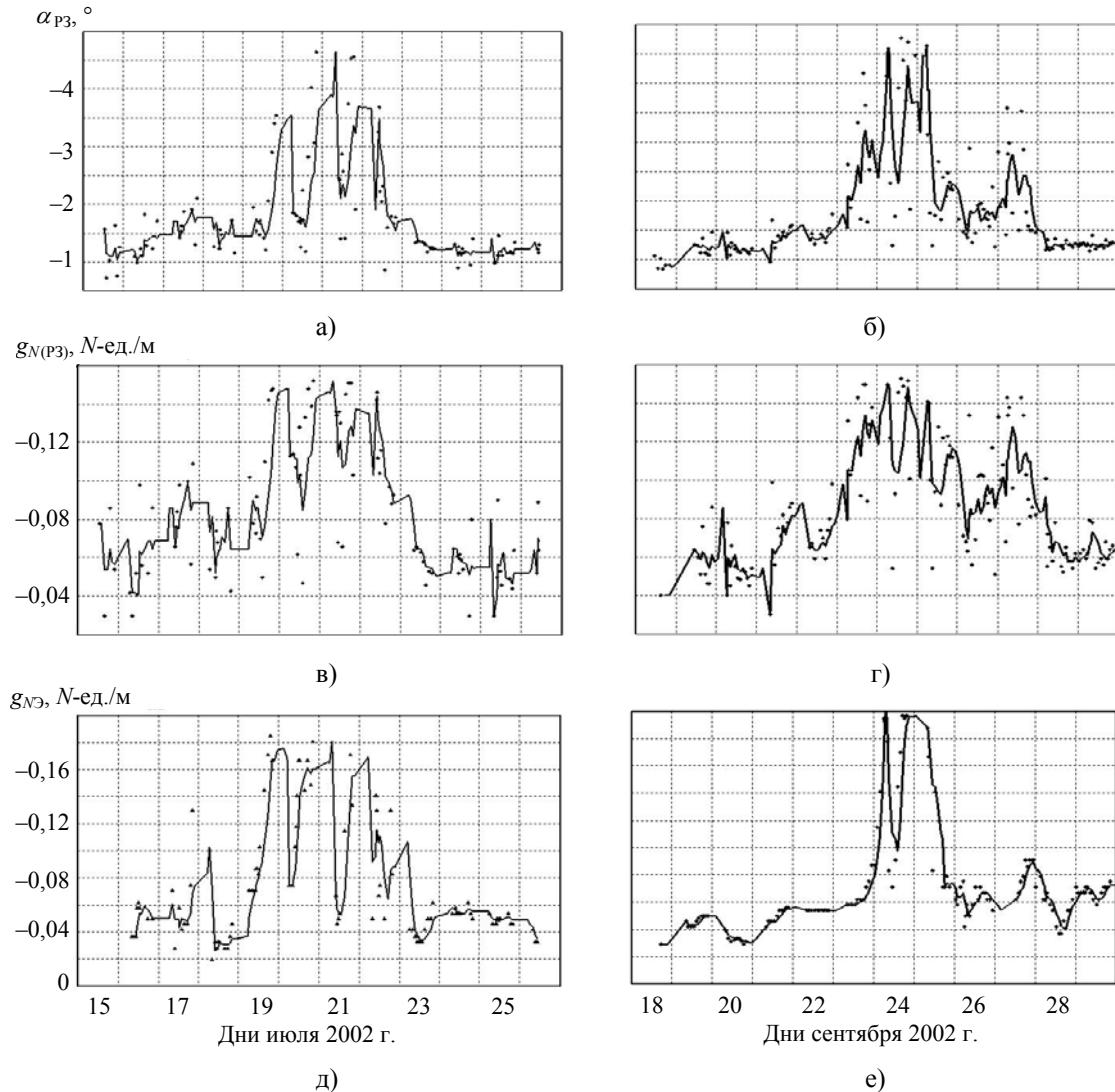


Рис. 6. Временные зависимости: а, б) – измеренных углов радиозахода  $\alpha_{P3}$ ; в, г) – градиентов  $g_{N(P3)}$ , восстановленных по модели [5]; д, е) – градиентов  $g_{N(z)}$ , восстановленных по методу [6]; а, в, д) – июль; б, г, е) – сентябрь

**Выводы.** Наблюдаемое в экспериментах разнообразие амплитудных реализаций радиосигналов в области тени при заходах спутников GPS над морем (нормальные и аномальные типы) обусловлено изменчивостью тропосферной рефракции. При этом угломестные характеристики радиозаходов GPS подобны дистанционным зависимостям множителя ослабления на внутритропосферных морских трассах ДТР.

В проведенных сериях экспериментов из результатов корреляционного и регрессионного анализа следует некоторое преимущество определения градиента коэффициента преломления по углу радиозахода GPS по сравнению с определением его по крутизне дифракционного участка множителя ослабления.

Градиенты коэффициента преломления, восстановленные по спутниковым измерениям, согласуются со значениями эффективных гра-

диентов, определенных на приводной трассе по методу В. Н. Троицкого. Коэффициенты корреляции по отдельным опытам превышают 0,53, а при усреднении достигают 0,85...0,9.

Работа выполнена при частичной поддержке УНТЦ, проект № 144. Авторы признательны С. И. Хоменко, В. А. Миронову, В. Б. Зама-раеву и Б. М. Курко за помощь при проведении экспериментов.

#### Библиографический список

1. *Использование сигналов навигационных ИСЗ для определения параметров атмосферы* / А. А. Азизов, К. П. Гайкович, С. С. Кашкаров, М. Б. Черняева // Изв. вузов. Радиотехника. – 1998. – 41, № 9. – С. 1093–1116.
2. *Арманд Н. А.* Восстановление профиля коэффициента преломления тропосферы по измерениям частоты сигналов искусственного спутника Земли / Н. А. Арманд, В. А. Андрианов, В. М. Смирнов // Радиотехника и электрон. – 1987. – 32, № 4. – С. 673–680.

3. Anderson K. D. Inference of refractivity profiles by satellite-to-ground RF measurements / K. D. Anderson // Radio Science. – 1982. – 17, N 3. – P. 653–663.
4. Колосов М. А. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса / М. А. Колосов, А. В. Шабельников. – М.: Сов. радио, 1976. – 220 с.
5. Замираев В. Б. Определение характеристик тропосферной рефракции в зоне тени по излучению удаленного источника. Часть 1. Модель / В. Б. Замираев, В. Б. Синицкий // Радиофизика и электрон. – 2014. – 5(19), № 3. – С. 41–48.
6. Троицкий В. Н. О замираниях ультракоротких волн на радиорелейных линиях связи / В. Н. Троицкий // Электросвязь. – 1957. – № 10. – С. 32–39.
7. Изменчивость характеристик сигналов GPS, распространяющихся в приводном слое атмосферы / В. Б. Замираев, В. А. Кабанов, Г. М. Моргун, В. Б. Синицкий // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2004. – 9, № 3. – С. 541–548.
8. Вариации тропосферной рефракции над морем. Совместные измерения на стационарной и спутниковых трассах / В. Б. Замираев, В. А. Кабанов, Г. М. Моргун, В. Б. Синицкий // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2005. – 10, № 3. – С. 386–393.
9. Распространение ультракоротких радиоволн / пер. с англ. под ред. Б. А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954. – 710 с.
10. Диагностика условий распространения УКВ в тропосфере / Б. В. Жуков, В. А. Кабанов, И. М. Мыщенко и др.; под ред. Г. И. Хлопова. – К.: Наук. думка, 2010. – 264 с.

Рукопись поступила 29.08.2014.

V. A. Kabanov, G. M. Morgun,  
V. B. Sinitsky, I. S. Tourgenev

DETERMINATION OF TROPOSPHERE  
REFRACTIVE CHARACTERISTICS  
IN SHADOW ZONE  
BY DISTANT SOURCE RADIATION  
Part 2. Experiment

The operational assessment of a troposphere refraction is the actual task which is necessary for increasing the efficiency of radio engineering systems. The results of experimental investigation of a troposphere refraction over the sea using the signals of GPS navigation system satellites are presented. The feature of work is the using of a shadow zone in which characteristics of signals are most changeable and sensitive to refraction variations. The parabolic antenna is applied to amplify GPS signals in the shadow zone. In the experiments using radio setting of GPS satellites over the sea, the patterns of the signals are observed

corresponding to standard, heightened refraction and the waveguide propagation. The gradients of a high-rise profile of refraction coefficient of a troposphere surface layer are restored from experimental data. They are calculated according to the developed model, on an angle of radiosetting and on the slope of a diffraction site of an attenuation factor. The gradients restored from satellites data are compared to the effective gradients restored from signals levels on the near-water over-the-horizon path. Correlation coefficients of the gradients determined by data on the near-water and satellite paths, on counting in close sessions make ~0.53...0.78, when averaging data increase approximately to 0.85...0.9. The results of the carried out experiments can be used for development of satellite troposphere refraction diagnostics systems.

**Key words:** tropospheric refraction, shadow zone, satellite, refractive angle, effective gradient.

В. О. Кабанов, Г. М. Моргун,  
В. Б. Синицкий, I. С. Тургенев

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТРОПОСФЕРНОЇ РЕФРАКЦІЇ  
В ЗОНІ ТІНІ ПО ВИПРОМІНЮВАННЮ  
ВІДДАЛЕНОГО ДЖЕРЕЛА  
Частина 2. Експеримент

Оперативна оцінка тропосферної рефракції є актуальною задачею, необхідною для підвищення ефективності роботи радіотехнічних систем. У статті подано результати експериментальних досліджень тропосферної рефракції над морем по сигналам супутників навігаційної системи GPS. Особливістю роботи є використання зони тіні, у якій характеристики сигналів найбільш мінливі та чутливі до варіацій рефракції. Для підсилення сигналів GPS в області тіні застосовано параболічну антену. В експериментах, що використовують радіозаходи супутників GPS над морем, спостерігаються реалізації сигналів, які відповідають стандартній, підвищеній рефракції та хвилеводному поширенню. За експериментальними даними відновлюються градієнти висотного профілю коефіцієнта заломлення  $n(h)$  приводного шару тропосфери, обчислені в відповідності з розробленою моделлю по куту радіозаходу та крутизні дифракційної ділянки множника послаблення. Вони зрівнюються з ефективними градієнтами, відновленими по рівням сигналів на приводній загоризонтній трасі. Коефіцієнти кореляції масивів градієнтів, визначених по даним на приводній та супутникових трасах, по відлікам у близьких сеансах складають ~0,53...0,78, при усередненні даних зростають до 0,85...0,9. Результати проведених експериментів можуть бути використані при розробці систем супутникової діагностики тропосферної рефракції.

**Ключові слова:** тропосферна рефракція, зона тіні, супутник, кут рефракції, ефективний градієнт.