

## О ВЛИЯНИИ ЛИНИИ ГОРИЗОНТА НА ИЗМЕРЕНИЯ ТРОПОСФЕРНОЙ РЕФРАКЦИИ ПО РАДИОЗАХОДАМ СПУТНИКОВ GPS НАД СУШЕЙ

В. Б. Синицкий

*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)*

Представлены результаты натурных измерений углов радиозахода спутников GPS над поверхностью суши. Показана возможность отделения эффектов, связанных с неровной линией горизонта, от переменной составляющей, обусловленной сезонной изменчивостью характеристик тропосферной рефракции. При статистической обработке используется свойство синхронности орбит спутников GPS, способствующее группированию данных на фиксированных азимутальных направлениях. Ил. 6. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

**Ключевые слова:** тропосферная рефракция, угол радиозахода, спутники GPS, линия горизонта.

Рефракция – одна из важнейших характеристик атмосферы, влияющая на работу систем связи, радиолокации, геодезии. В последние годы для изучения рефракции применяются дистанционные методы, в том числе использующие излучение искусственных спутников Земли (ИСЗ). Такие методы позволяют проводить глобальный мониторинг атмосферы Земли по схеме радиопросвечивания [1], а также используются для наземных измерений рефракции [2–5]. Особый интерес представляют сигналы навигационных ИСЗ (GPS, ГЛОНАСС), имеющих высокоточную координатно-временную привязку.

Так как рефракционные эффекты в максимальной мере проявляются при малых углах места [6, 7], когда распространение радиоволн происходит вблизи поверхности раздела, существенную роль в измерениях рефракции играет подстилающая поверхность. При распространении над морем влияние поверхности, проявляющееся в образовании регулярной интерференционной структуры сигнала, может быть использовано в качестве положительного фактора в интерференционном методе измерения рефракции [4, 5]. При этом информативными параметрами являются угловые положения характерных точек интерференционной кривой – минимумов лепестковой структуры, а также точки радиозахода [5]. Над сушей, как правило, регулярная интерференционная структура отсутствует, и в качестве информативного измеряемого параметра может быть использована точка радиозахода. Однако в этом случае, в отличие от моря, угловое положение точки радиозахода зависит не только от случайных вариаций рефракции, но и от неровной поверхности в районе горизонта.

«Разделение» эффектов, обусловленных тропосферой и поверхностью раздела, которое производится над морем, например, с использованием пространственной селекции [8, 9], в данной работе основано на свойствах синхронности

орбит спутников GPS. Целью работы, в которой изложены результаты натурных измерений сигналов спутников GPS, заходящих над сушей за горизонт, является экспериментальная оценка мешающего влияния поверхности раздела на измерения тропосферной рефракции.

### 1. Условия проведения экспериментов.

Для исследования эффектов распространения над сушей в работе применена методика регистрации амплитуды сигналов GPS при их заходе над местностью со сложным рельефом. Измерения проведены в азимутальном секторе от 20 до 95°, в большей части которого линия горизонта свободна от застроек, ниже горизонта имеются дома различной высоты.

Спутники (космические аппараты – КА) GPS в количестве 32 штук расположены на почти круговых синхронных орбитах (период обращения 11 ч 58 мин, равен половине звездных суток) на удалении около 20 000 км от поверхности Земли. Синхронные орбиты спутников GPS имеют двухвитковый след на поверхности, повторяющийся с высокой точностью, в отличие от орбит спутников системы ГЛОНАСС, имеющих многовитковый след [10]. Передатчики спутников GPS излучают сложный трехчастотный фазоманипулированный сигнал, содержащий эфемеридную информацию. В экспериментах данной работы используется приемник Trimble ACE-III, конструктивно выполненный в одном блоке с штатной антенной Bullett-III, установленной на крыше здания высотой 30 м и направленной на горизонт, в середину рабочего сектора. Сигнал GPS диапазона L1 ( $f = 1575,42$  МГц), принятый приемником, регистрируется в компьютере в виде временной реализации в относительном логарифмическом масштабе, с темпом отсчетов 1 с. В сеансах (от 2 до 7 в день, продолжительностью 30–60 мин, в основном в дневное время) производится запись последнего участка реализации около горизонта, от углов места 15–20° до исчезно-

вения сигнала. Описываемой серии натурных экспериментов соответствует период с 1 августа 2006 г. до 20 сентября 2007 г.

Для интерпретации радиофизических экспериментов привлекаются данные гидрометеорологического центра и топографической съемки в районе измерений.

**2. Результаты измерений и обработки данных.** Для сравнения реализаций, полученных в разное время, при различных траекториях движения спутников, временные записи сигналов  $u(t)$  на начальном этапе обработки преобразуются в угломестные зависимости  $u(\alpha)$ . Это осуществляется посредством вычисления координат спутника для каждого момента времени (азимут, истинный угол места по отношению к точке наблюдения) по эфемеридам, записываемым в начале сеанса.

Примеры реализаций  $u(\alpha)$  сигналов спутников GPS, заходящих за горизонт, показаны на рис. 1 (рис. 1, а – над морем, рис. 1, б, в – над сушей).

В отличие от записей амплитудных реализаций над морем, где, как правило, имеет место интерференционная структура сигнала (рис. 1, а) [4, 5], для большей части реализаций сигналов над сушей характерны случайные флуктуации амплитуды в диапазоне углов места ниже  $10\text{--}20^\circ$ , что свидетельствует о диффузном рассеянии поля поверхностью раздела. Под некоторыми азимутами наблюдается лепестковая структура с различными периодами, обусловленная отражениями радиоволн от плоских участков местности, водоемов или элементов зданий. При углах места ниже  $1\text{--}2^\circ$  записи амплитуды, вследствие влияния погодных условий, наиболее изменчивы в разных опытах и, как правило, сопровождаются тропосферными флуктуациями различной интенсивности (рис. 1, б – минимальные флуктуации, так называемый «нормальный» радиозаход, рис. 1, в – интенсивные флуктуации). В каждой реализации  $u(\alpha)$  в качестве измеряемого параметра отмечается угловое положение точки радиозахода  $\alpha_{p3}$  (последняя точка реализации) и рассчитывается азимут  $\beta_0$ , соответствующий нулевому углу места спутника.

По записям сигналов «нормального» типа, подобных изображенным на рис. 1, б, на которых виден линейный (в логарифмическом масштабе) наклон дифракционного участка (с крутизной примерно  $0,015$  град/дБ), можно приблизительно оценить погрешность измерения угла радиозахода. Так как согласно экспериментальным наблюдениям суммарный вклад разных факторов (различие мощности передатчиков разных спутников и усиления приемной антенны в раз-

ных азимутальных направлениях, вариации уровня, отмечаемого приемником в отсутствие сигнала и др.) не превышает величину  $\sim 1,5 \div 3$  дБ, квазимаксимальная погрешность определения угла радиозахода может находиться в пределах  $\approx 0,02 \div 0,05^\circ$ .

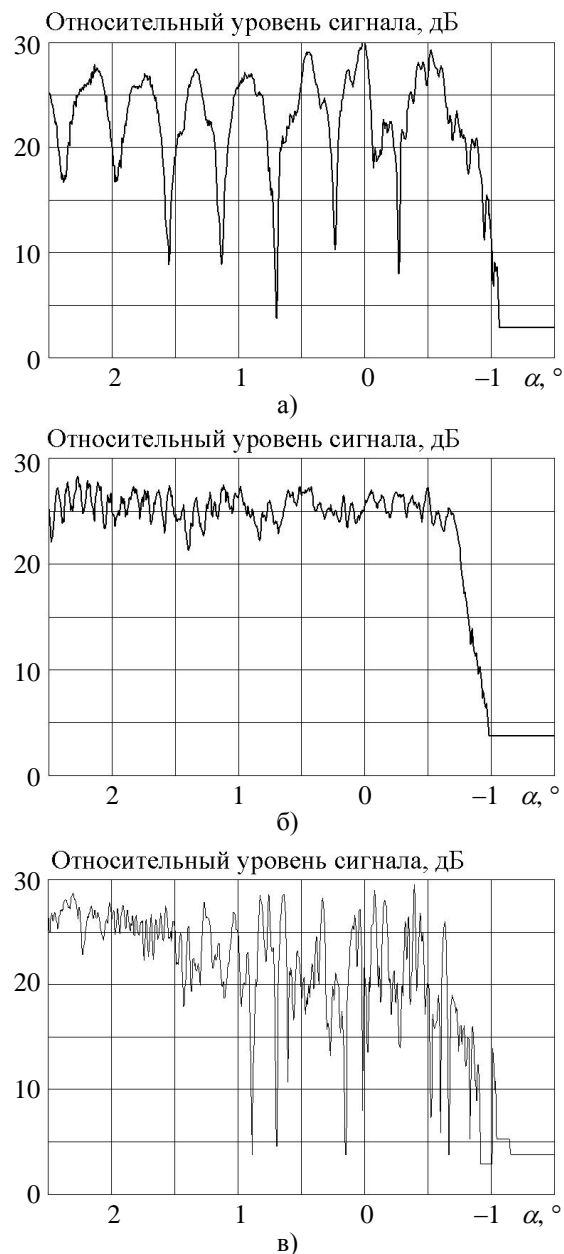


Рис. 1. Примеры записей сигналов GPS, заходящих в различных условиях: а) – над морем; б) – над сушей, «нормальный» радиозаход (малые тропосферные флуктуации); в) – над сушей, интенсивные флуктуации

Результаты экспериментов в виде временных рядов измеряемых параметров представлены на рис. 2. На рис. 2, а изображены углы радиозахода  $\alpha_{p3}$ , на рис. 2, в – азимутальные углы  $\beta_0$  для 14 спутников.

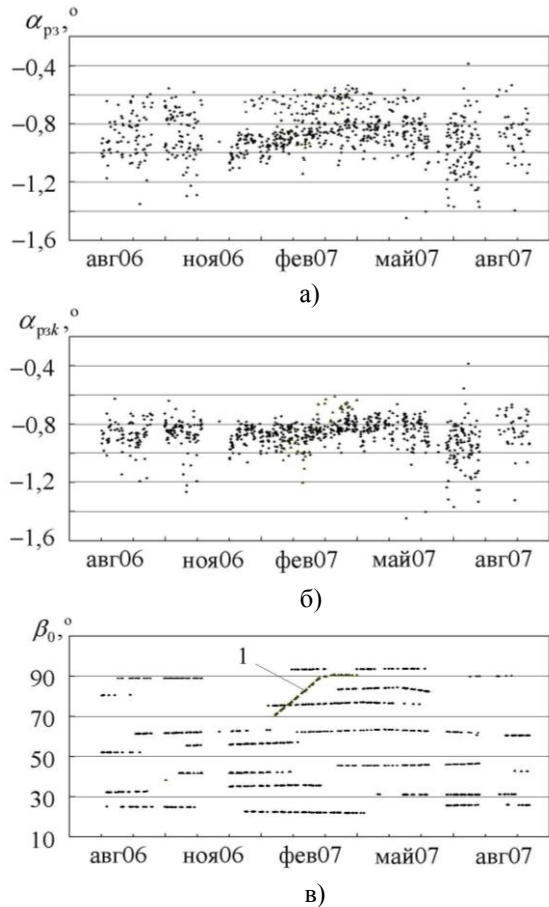


Рис. 2. Временные ряды характеристик сигналов GPS, заходящих над сушей: а) – углы радиозахода, исходные данные  $\alpha_{p3}(t)$ ; б) – углы радиозахода, скорректированные данные  $\alpha_{p3k}(t)$ ; в) – азимутальные углы  $\beta_0(t)$ , 1 – временной ход азимута КА24

Данные по  $\alpha_{p3}$  общего массива данных (рис. 2, а) демонстрируют разброс значений в среднем в пределах от  $-0,53$  до  $-1,4^\circ$ , при этом среднеквадратичное отклонение (СКО)  $\sigma_{\alpha_{p3}} = 0,182^\circ$ .

Из анализа рис. 2, а следует, что данные каждого спутника имеют систематическое смещение по отношению к данным других спутников. Исключая время из графиков рис. 2, а, в, построим зависимость углов радиозахода  $\alpha_{p3}$  от азимута  $\beta_0$ , представленную на рис. 3. Из нее видно, что данные каждого КА группируются на определенных фиксированных азимутальных направлениях, средние значения которых  $\langle \Delta\beta \rangle$  представлены в таблице. В ней также даны интервалы измерений и их продолжительность, количество опытов, суточное  $\Delta\beta_{сут}$  и максимальное (за интервал измерений)  $\Delta\beta_m$  приращение азимута для каждого из наблюдавшихся спутников GPS и другие параметры.

В процессе статистической обработки массивов данных найдены интегральные распределения,

медианные значения  $\alpha_{мед}$  и среднеквадратичные отклонения  $\sigma_{\alpha_{p3}}$  углов радиозахода каждого КА.

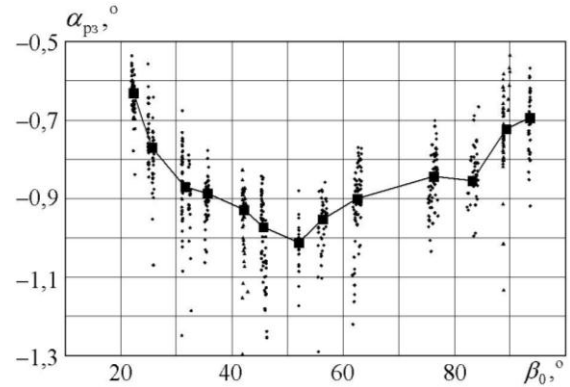


Рис. 3. Азимутальная зависимость углов радиозахода  $\alpha_{p3} = f(\beta_0)$ : ■ – медианные значения массивов  $\alpha_{p3}$  каждого КА

Интегральные распределения  $P(\alpha_{p3})$ , показывающие, в каком проценте случаев величина  $\alpha_{p3}$  меньше значения, указанного на оси абсцисс, представлены на рис. 4, а найденные по ним значения  $\alpha_{мед}$  даны в таблице и перенесены на рис. 3 (в виде символов ■).

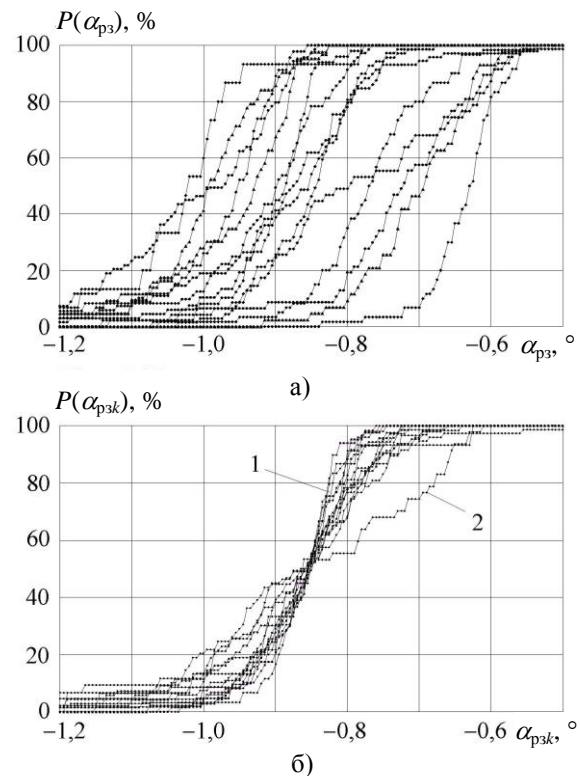


Рис. 4. Распределения углов радиозахода GPS, построенные: а) – по исходным данным  $\alpha_{p3}$ ; б) – по скорректированным данным  $\alpha_{p3k}$ ; 1 – распределения для всех спутников, кроме КА24; 2 – распределение для КА24

Азимутальные смещения и медианные значения углов радиозахода спутников GPS в периоды измерений

№ спутника	Интервалы измерений	Продолжительность интервалов измерений, сут	Количество опытов с GPS	Среднее значение азимута $\langle \Delta\beta \rangle$ , град	Суточное приращение азимута $\Delta\beta_{сут}$ , град	Максимальное приращение азимута $\Delta\beta_m$ , град	Линейное приращение азимута на горизонте $\Delta l_m$ , м	Медианные значения углов захода $\alpha_{мед}$ , град
КА01	19.03.07 – 15.06.07	89	44	82,753	0,016	0,908	348	-0,854
КА02	23.10.06 – 08.02.07	108	46	56,271	0,015	1,666	639	-0,952
КА04	16.10.06 – 01.02.07	107	43	42,179	0,005	0,588	225	-0,928
КА10	04.12.06 – 02.03.07	88	49	35,588	0,010	0,669	256	-0,886
КА14	07.02.07 – 02.08.07	176	69	62,544	0,016	1,653	635	-0,900
КА16	26.04.07 – 07.09.07	134	68	31,562	0,012	0,194	74	-0,870
КА18	10.01.07 – 06.06.07	147	69	76,316	0,02	1,76	676	-0,844
КА19	07.08.06 – 31.10.06	85	32	24,554	0,003	0,26	99	-0,770
КА22	02.02.07 – 11.06.07	172	43	93,51	0,002	0,319	122	-0,694
КА24	17.01.07 – 01.03.07	43	30	80,122	0,427	18,381	7057	-
КА25	02.08.06 – 08.09.06	37	25	52,03	0,0002	0,044	17	-1,012
КА26	19.12.06 – 13.04.07	125	60	22,277	0,005	0,663	254	-0,630
КА28	18.08.06 – 07.11.06	81	47	89,3	0,0007	0,057	22	-0,722
КА31	19.03.07 – 03.08.07	137	69	45,611	0,002	0,904	347	-0,972

Соответствующие каждому КА временные зависимости азимутальных углов (рис. 2, в, таблица) указывают на малые суточные  $\Delta\beta_{сут} = 0,0002 \div 0,02^\circ$  и максимальные  $\Delta\beta_m = 0,044 \div 1,76^\circ$  азимутальные смещения  $\Delta\beta$  для большинства спутников (за исключением КА24).

Здесь проявляется свойство синхронности орбит спутников GPS, из которого следует ежесуточная повторяемость траектории спутника по отношению к наблюдателю. Поэтому данные каждого КА группируются вокруг своего медианного значения  $\alpha_{мед}$ , определяемого конкретным углом возвышения линии горизонта  $\gamma$  на данном азимуте  $\beta_0$ .

Степень стабильности азимутальных положений точек захода может быть оценена путем сопоставления их линейных азимутальных смещений  $\Delta l_m = R_{пр} \Delta\beta_m$  с поперечником зоны, существенной для распространения радиоволн

$d_c = 2\rho_c$ , где  $\rho_c$  – радиус этой зоны,  $R_{пр}$  – дальность радиогоризонта, характерная для данной задачи.

При высоте приемной антенны  $h_a = 30$  м дальность радиогоризонта равна  $R_{пр} = 4,12\sqrt{h_a} \cong \cong 22$  км.

Согласно [7]

$$\rho_c = \sqrt{(8 \div 12) \frac{\lambda R (R_0 - R)}{R_0}},$$

где  $\lambda \approx 0,19$  м – длина волны GPS;  $R$  – дальность, на которой вычисляется  $\rho_c$  (в данном случае  $R \approx R_{пр}$ );  $R_0 \approx 25600$  км – расстояние между источником и приемником при нулевых углах места спутника, в скобках примем среднее значение, равное 10.

Так как  $R = R_{пр} \ll R_0$ ,  $\rho_c \approx \sqrt{10\lambda R_{пр}} \approx \approx 200$  м и, соответственно,  $d_c \approx 400$  м.

Сравним полученное значение  $d_c$  с линейными смещениями  $\Delta l_m$  каждого КА на радиогоризонте, рассчитанные значения которых помещены в таблице. Из этих данных видно, что для большинства КА условие  $\Delta l_m \leq d_c$  практически выполняется, т. е. их азимутальные смещения за соответствующие периоды наблюдения не превышают зоны, существенной для распространения радиоволн. Еще у трех спутников это значение несколько превышено (примерно в 1,7 раза), а у КА24 – превышение значительное.

Кривые интегральных распределений  $P(\alpha_{p3})$  имеют различные смещения и разные наклоны (рис. 4, а).

Смещение и наклон кривых имеют различную природу и должны быть рассмотрены отдельно. Можно предположить, что смещение

распределений связано с влиянием неровной линии горизонта, а вариации их наклонов, главным образом, обусловлены изменчивостью тропосферных процессов.

Для проверки первого предположения рассмотрим рис. 5, а, где показано сравнение данных топографической съемки рабочего сектора местности (углы возвышения линии горизонта  $\gamma$ , измеренные буссолью в процессе нескольких независимых измерений – группа кривых 1), с медианными значениями углов радиозахода  $\alpha_{мед}$ , расположенными в соответствии с азимутом каждого спутника (кривая 2 – повторение сплошной линии рис. 3). На рис. 5, а даны две шкалы: в градусах – для медианных значений  $\alpha_{мед}$  и в миллирадианах – для топографических данных.

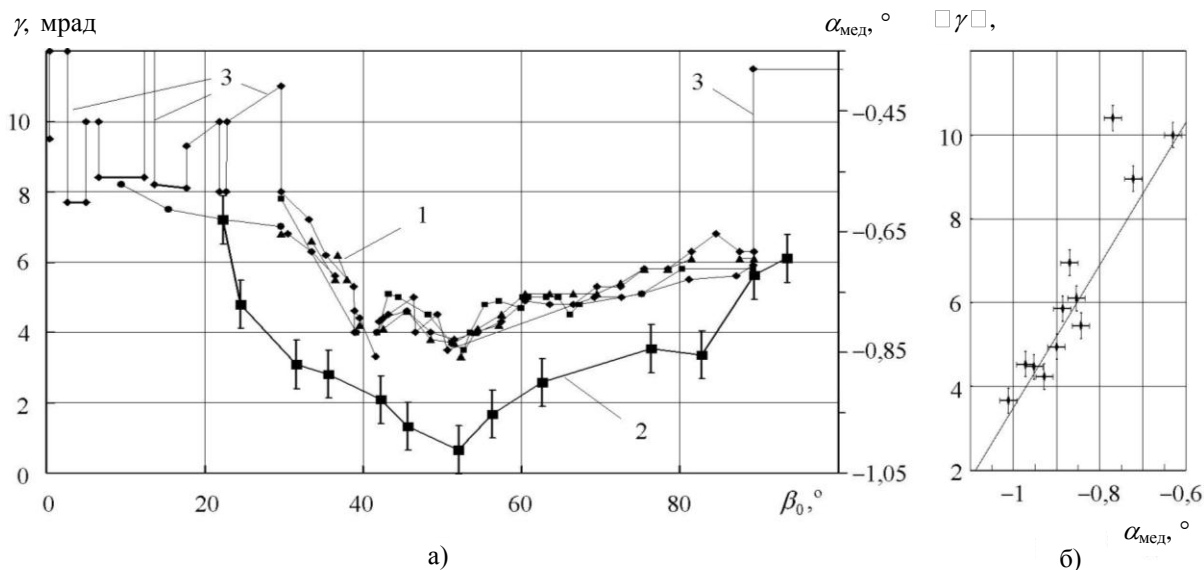


Рис. 5. Сопоставление данных топографической съемки углов возвышения  $\gamma$  местного горизонта с медианными значениями  $\alpha_{мед}$  углов радиозахода спутников GPS: а) – азимутальные зависимости: 1 –  $\gamma = f(\beta_0)$ ; 2 –  $\alpha_{мед} = f(\beta_0)$ ; 3 – здания; б) – зависимость  $\langle \gamma \rangle = f(\alpha_{мед})$

Из рисунка следует общее подобие кривых 1 и 2, а коэффициент корреляции между  $\alpha_{мед}$  и средними значениями  $\langle \gamma \rangle$  топографических данных под соответствующими азимутами равен 0,83. На рисунке заметна незначительная тенденция уменьшения  $\alpha_{мед}$  на азимутах, близких к краям рабочего сектора, по-видимому, вызванная дополнительным затенением радиоволн зданиями, возвышающимися над линией горизонта. Связь  $\alpha_{мед}$  и  $\langle \gamma \rangle$ , с учетом коэффициента пересчета  $1^\circ \approx 17$ мрад (прямая линия), показана на рис. 5, б, «усы» соответствуют погрешности измерения каждой из величин.

Следовательно, специфический характер азимутальной зависимости медианных значений углов радиозахода  $\alpha_{мед} = f(\beta_0)$  (рис. 3 и 5, а), а также взаимное смещение интегральных распределений на рис. 4, а можно объяснить влиянием неровной линии местного горизонта.

Исходные данные по  $\alpha_{p3}$ , представленные на рис. 2, а, были скорректированы с целью устранения систематических смещений (условно приведены к «ровному горизонту»). Для этого элементы массивов  $\alpha_{p3}$  каждого  $j$ -го спутника были уменьшены на величину  $\delta_j = \alpha_{мед(j)} - \alpha_{мед(01)}$ , представляющую собой разность между его ме-

дианным значением и медианным значением одного из выбранных спутников (КА01). По скорректированным данным построен новый временной ряд  $\alpha_{рз}$  (рис. 2, б) и рассчитаны новые распределения  $P(\alpha_{рз})$ , совмещенные по медианному значению (рис. 4, б). Рассчитано новое СКО общего массива скорректированных данных,  $\sigma_{\alpha_{рз}} = 0,122^\circ$ , которое примерно в 1,5 раза отличается от прежнего значения  $\sigma_{\alpha_{рз}} = 0,182^\circ$  для некорректированных данных. Уменьшение СКО скорректированных данных по сравнению с исходными в 1,5 раза (падение дисперсии почти в два раза) означает, что в данной серии опытов, проведенной в среднеконтинентальном климате над слабопересеченной местностью, вклад тропосферы и поверхности раздела в интенсивность исходных вариаций  $\alpha_{рз}$  примерно соизмерим.

Различные наклоны распределений  $P(\alpha_{рз})$  могут быть связаны с различной интенсивностью исходных случайных процессов, обусловленной влиянием метеорологических (сезонных) факторов, поэтому для их интерпретации необходимо привлечь радиометеорологические параметры. По данным метеостанции Харьковского ГМЦ (температура, давление, относительная влажность), вычислена временная зависимость приземного значения коэффициента преломления  $N_0$  за период измерений (рис. 6, а). Видно нестационарный характер (как по среднему значению, так и по переменной составляющей) и сезонную зависимость  $N_0$ . По временному ряду  $N_0$  рассчитано СКО приземного значения коэффициента преломления  $\sigma_{N_0}$  (рис. 6, б) в виде скользящей характеристики, усредненной на интервале 1 месяц.

Как видно из рис. 6, а, б, метеорологические характеристики имеют выраженный сезонный ход. Подобный характер иллюстрируют и данные радиофизических измерений со спутниками GPS (СКО углов радиозахода каждого спутника), изображенные на рис. 6, в.

При построении этого рисунка понадобилась дополнительная обработка данных по  $\alpha_{рз}$ . Это вызвано тем, что интервалы наблюдений большинства спутников достаточно продолжительны (могут длиться до 4–5 месяцев и занимать более одного сезона, см. рис. 2, в и таблицу), поэтому для определения сезонной зависимости исходные интервалы измерений были разбиты на меньшие периоды длительностью до одного месяца. Укороченные периоды показаны на рис. 6, в, СКО углов радиозахода отмечены на их серединах. Сезонный ход СКО углов радиозахода

$\sigma_{\alpha_{рз}}$  в общих чертах подобен сезонному ходу  $N_0(t)$  (рис. 6, а) и  $\sigma_{N_0}$  (рис. 6, б). При качественном согласии указанных характеристик следует, однако, отметить некоторое смещение минимума радиофизических данных в сторону весенних месяцев по сравнению с минимумами  $N_0(t)$  и  $\sigma_{N_0}$  что может быть предметом уточнения в последующих экспериментах.

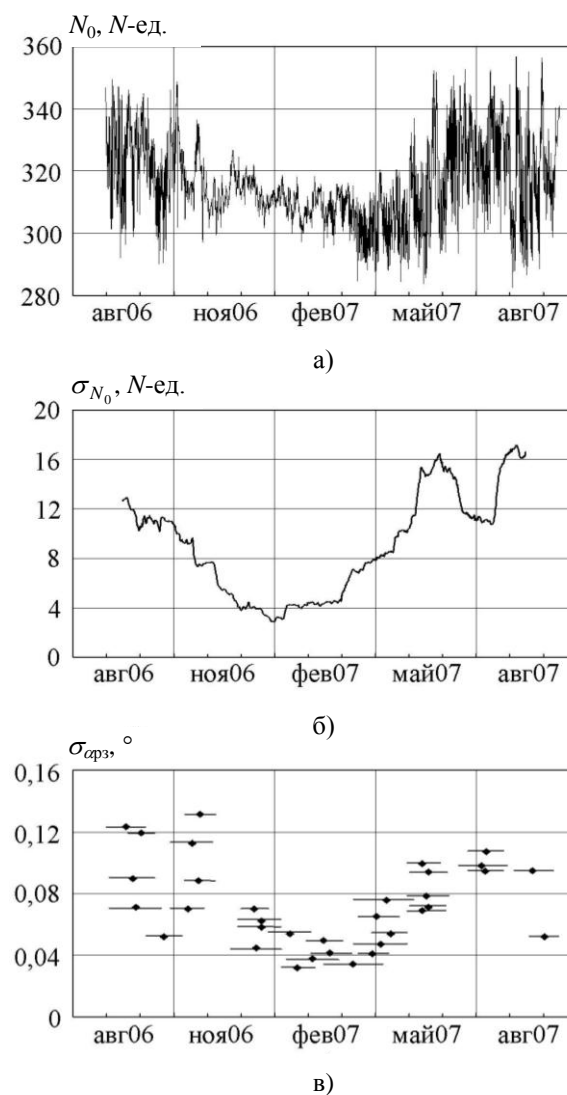


Рис. 6. Сопоставление временных рядов метеорологических и радиофизических характеристик: а) – приземное значение коэффициента преломления  $N_0$ ; б) – скользящее СКО  $N_0$ , усреднение 1 месяц; в) – СКО углов захода спутников GPS на интервалах 1 месяц

Вместе с тем, на наклоны распределений могут частично влиять не только метеорологические (сезонные) факторы, но и поверхность раздела, в чем можно убедиться на следующем примере.

В экспериментах было замечено уже упоминавшееся выше anomalous поведение одного из спутников (КА24). На некотором временном

интервале его орбита оказалась не соответствующей свойству синхронности, присущей остальной группе наблюдавшихся КА (согласно принимаемым эфемеридам, большая полуось КА24 оказалась примерно на 15 км больше обычного значения, а период обращения увеличился почти на 1 мин). Следствием этого явилось аномально большое азимутальное смещение КА24 (более  $18^\circ$  за 45 дней, ежесуточное смещение  $\sim 0,42^\circ$ , см. таблицу и рис. 2, в). Такая ситуация сказалась на интегральном распределении  $P(\alpha_{pз})$  КА24 (кривая 2 на рис. 4, б), которое отличается от остальных распределений (группа кривых 1). Очевидно, на этом временном интервале КА24 вышел за пределы зоны, существенной для распространения радиоволн, и перемещался над различными участками неровной поверхности, что внесло дополнительные вариации в углы радиозахода. Следовательно, в случаях, когда азимутальное смещение спутника не превышает зону, существенную для распространения радиоволн, вариации  $\alpha_{pз}$  на данном азимуте определяются в основном изменчивостью метеорологических процессов, в противоположном случае может иметь место совместное влияние на характеристики радиозаходов как тропосферы, так и поверхности раздела.

**Выводы.** Угловые положения точек радиозахода спутников *GPS* по отношению к наблюдателю, расположенному вблизи поверхности Земли, определяются изменчивостью атмосферных условий и влиянием рельефа местного горизонта, который вносит маскирующие эффекты в виде дополнительных смещений углов радиозахода спутников. Вклад обоих факторов по данным нашей работы, проведенной в среднеконтинентальном климате над слабопересеченной местностью, соизмерим.

Использование свойства синхронности орбит КА *GPS*, способствующего группированию данных на фиксированных азимутальных направлениях в пределах зоны, существенной для распространения радиоволн, позволяет путем статистической обработки результатов измерений углов радиозахода выделить эффекты, связанные с неровной линией горизонта.

Переменная составляющая углов радиозахода ( $\sigma_{apз}$ ), усредненная на временных интервалах порядка месяца, иллюстрирует сезонную зависимость, согласующуюся с аналогичной характеристикой радиометеорологических параметров – приземного значения коэффициента преломления и его СКО.

Рассмотренные особенности приема сигналов *GPS* над сушей могут быть полезными при проведении рефракционных измерений в задаче диагностики условий распространения радиоволн по сигналам ИСЗ, а также использоваться в ка-

честве реалистических оценок информативных параметров при разработке методов решения обратных задач рефракции. При этом в измеренные данные по углам радиозахода необходимо вносить поправки, связанные с наличием локальных особенностей местности, влияющих на величину углов возвышения горизонта, которые могут быть определены по данным топографической съемки или непосредственно из длительных серий измерений со спутниками *GPS*.

1. *Observing the Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System* / E. R. Kursinski, G. A. Hajj, J. T. Schofield et al. // *J. Geophys. Res.* – 1997. – 102, N D19. – P. 3429–3465.
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. *Использование сигналов навигационных ИСЗ для определения параметров атмосферы* / А. А. Азизов, К. П. Гайкович, С. С. Кашкаров и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 1998. – 41, № 9. – С. 1093–1116.
4. *Anderson K. D. Inference of refractivity profiles by satellite-to-ground RF measurements* / K. D. Anderson // *Radio Sci.* – 1982. – 17, N 3. – P. 653–663.
5. *Вариации тропосферной рефракции над морем. Совместные измерения на стационарной и спутниковых трассах* / В. Б. Замараев, В. А. Кабанов, Г. М. Моргун, В. Б. Синицкий // *Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины.* – X, 2005. – 10, № 3. – С. 386–393.
6. *Колосов М. А. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса* / М. А. Колосов, А. В. Шабельников. – М.: Сов. радио, 1976. – 220 с.
7. *Калинин А. И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний* / А. И. Калинин. – М.: Связь, 1979. – 266 с.
8. *Thompson M. C. Effects of sea reflections on phase of arrival of line-of-sight signals* / M. C. Thompson, H. B. Jr. Janes // *IEEE Trans. On Antennas and Propagation.* – 1971. – AP-19, N 1. – P. 105–108.
9. *Лобкова Л. М. Распространение радиоволн над морской поверхностью* / Л. М. Лобкова. – М.: Радио и связь, 1991. – 256 с.
10. *Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС* / Н. М. Волков, Н. Е. Иванов, В. А. Салищев и др. // *Зарубеж. радиоэлектрон. Успехи современной радиоэлектрон.* – 1997. – № 1. – С. 31–46.

## THE INFLUENCE OF HORIZON LINE ON MEASUREMENTS OF TROPOSPHERE REFRACTION USING GPS SATELLITES RADIOSETTINGS OVER THE DRY LAND

V. B. Sinitzky

The results of field measurements of *GPS* satellites radiosetting angles above the dry land surface are presented. The possibility for separating the effects related to the uneven horizon line from the variable component due to seasonal changeability of troposphere refraction is shown. The property of synchronism of *GPS* satellites orbits is used in statistical processing which is conducive to grouping the data being measured in the fixed azimuthal directions.

**Key words:** troposphere refraction, radiosetting angle, *GPS* satellites, horizon line.

ПРО ВПЛИВ ЛІНІЇ ГОРИЗОНТУ  
НА ВИМІРЮВАННЯ ТРОПОСФЕРНОЇ  
РЕФРАКЦІЇ ПО РАДІОЗАХОДАХ  
СУПУТНИКІВ *GPS* НАД СУШЕЮ

В. Б. Синицький

Приведено результати натурних вимірювань кутів радіозаходу супутників *GPS* над поверхнею суші. Показано

можливість відділення ефектів, зв'язаних з нерівною лінією горизонту, від змінної складової, обумовленої сезонною мінливістю характеристик тропосферної рефракції. При статистичній обробці використовується властивість синхронності орбіт супутників *GPS*, що сприяє групуванню даних на фіксованих азимутальних напрямках.

**Ключові слова:** тропосферна рефракція, кут радіозаходу, супутники *GPS*, лінія горизонту.

*Рукопись поступила 6 августа 2009 г.*