

Радиоклиматические особенности Вьетнама

В.И. Луценко¹, И. В. Луценко¹, И.В. Попов¹, Н.С. Ань (Nguyen Xuan Anh)²

¹Институт Радиофизики и Электроники им. А. Я. Усикова НАНУ, 61085, Харьков, ул. Проскуры, 12, e-mail: secretar@ire.kharkov.ua

²Vietnam Academy of Science and Technology, Vietnam, F8, 18 Hoang Quoc Viet Str., Cau Giay Dist., Hanoi, Vietnam

Проведено рассмотрение сезонного и суточного поведения коэффициентов преломления тропосферы для средней полосы (Украина) и субтропической зоны (Вьетнама). Показано, что для Вьетнама характерен ряд особенностей сезонного изменения коэффициента преломления: меньший перепад между сезонами и в течении суток – для южных районов и в некоторых случаях бимодальность для северных районов. Для описания сезонного поведения лучше, чем при аппроксимации Гауссовыми кривыми дает использование атомарных функций Кравченко-Рвачева.

The seasonal and diurnal behavior of the refractive indices of the troposphere for the middle band (Ukraine) and the subtropical zone (Vietnam) was considered. It is shown that Vietnam has a number of features of the seasonal change in the refractive index: a smaller difference between the seasons and during the day - for the southern regions and in some cases bimodality for the northern regions. For describing seasonal behavior, better than approximation with Gaussian curves is the use of Kravchenko-Rvachev atomic functions.

Введение

Эффективность работы систем навигации, радиолокации, связи в значительной мере зависит от условий распространения радиоволн, определяемых состоянием атмосферной рефракции. Она, в свою очередь, обусловлена пространственно-временным распределением коэффициента преломления N . Поэтому изучение сезонного, суточного и высотного распределения N , создание его статистической модели представляет значительный интерес для прогнозирования дальности действия радиотехнических систем различного назначения, а также оценки точности измерения координат глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

Ключевым моментом для решения ряда задач связанных с точным позиционированием и диагностикой атмосферы при помощи систем глобальной навигации является изучение влияния на распространения радиоволн тропосферных и ионосферных процессов, а также разработка моделей этих явлений и на их основе – методов коррекции ошибок. Тропосферная и ионосферная рефракция приводят к появлению ошибок измерения координат, однако в случае ионосферной рефракции задержки могут быть компенсированы, в большей мере, при использовании двухчастотных режимов работы ГНСС (GPS, GLONASS, BeiDou). В случае тропосферных задержек, которые зависят от пространственно-временного распределения коэффициента преломления по трассе, необходимо создание модели его описания. В настоящем разделе приведены результаты экспериментального изучения поведения коэффициента преломления тропосферы на протяжении нескольких сезонов для различных регионов в средней полосе (Украины) и субтропической зоны (Вьетнама), что позволяет выявить особенности его поведения характерные для субтропической зоны.

1. Сезонная изменчивость коэффициента преломления тропосферы над сушей в средней полосе широт

Характер распространения радиоволн в тропосфере, приземном слое нейтральной атмосферы, определяется состоянием этого слоя и процессами, происходящими в нем. Атмосферные процессы, с одной стороны, обусловлены меняющимся режимом нагрева тропосферы Земли, в результате чего имеют место перемещения воздуха в вертикальном направлении. С другой стороны, из-за различия температур в разных областях земного шара происходят горизонтальные циркуляции воздушных масс. Очевидно, что интенсивность этих процессов существенным образом зависит от широты. Все эти процессы сопровождаются конденсацией водяных паров, появлением облаков, выпадением осадков. При этом наряду с упорядоченным перемещением воздушных масс имеет место и хаотичное турбулентное движение воздуха. Влияние атмосферы и атмосферных процессов проявляется в искривлении направлений распространения радиоволн, их рассеивании случайными неоднородностями среды и гидрометеорами, поглощении радиоволн.

Для изучения статистических характеристик коэффициентов преломления в различных типах местности средней полосы широт, использовались данные для различных регионов Украины, расположенной в средней полосе широт. В каждом из регионов, охватывающих различные по морфологии типы местности (гористую, равнинную и прибрежные районы) были выбраны по несколько (4...5) населенных пунктов, в которых метеорологические станции измеряли стандартный набор метеорологических параметров: температуру t , влажность η , давление P с достаточной точностью. С использованием соотношения [1] оценивалось значение коэффициента преломления

$$N = \frac{103,46}{t + 273} P + \frac{3730 \cdot 6,1 \cdot 10^{\frac{7,63t}{242+t}} \cdot \eta}{(t + 237)^2}, \quad (1)$$

На рис. 1 (1) для населенных пунктов, относящихся к разным регионам по своим морфологическим особенностям, приведено поведение коэффициента преломления тропосферы на протяжении полутора лет (с 01.01.2010 по 30.06.2011). Видно, что для всех регионов характерен сезонный ход зависимости коэффициента преломления. Максимальные значения его приходятся на летние месяцы - июнь-август. Как следствие в летний период в тропосфере наибольшая вероятность появления инверсионных слоев и повышенной рефракции [2], что приводит к наибольшим погрешностям измерения координат, по сравнению с другими сезонами, когда состояние тропосферы меньше отличается от стандартного. Поведение коэффициента преломления на протяжении года является существенно нестационарным процессом. Гистограммы распределения коэффициентов преломления для различных регионов за период с января 2010г. по июнь 2011г. приведены на рис. 1 (2). Они приведены в нормированных координатах: плотность распределения, нормирована на ее максимальное значение, а абсцисса центрирована относительно среднего и нормирована на среднеквадратичное значение. Следует отметить негауссов характер закона распределения коэффициента преломления для всех регионов. Формы плотности распределения для регионов, принадлежащих к разным группам, существенно отличаются от гауссова закона распределения. Поскольку периодичность процесса связана с его годовыми изменениями, то при построении гистограмм распределения, функций распределения, а также моментных характеристик необходимо выбирать для анализа интервалы кратные годовому циклу. При этом выбор начального момента анализа не существенен.

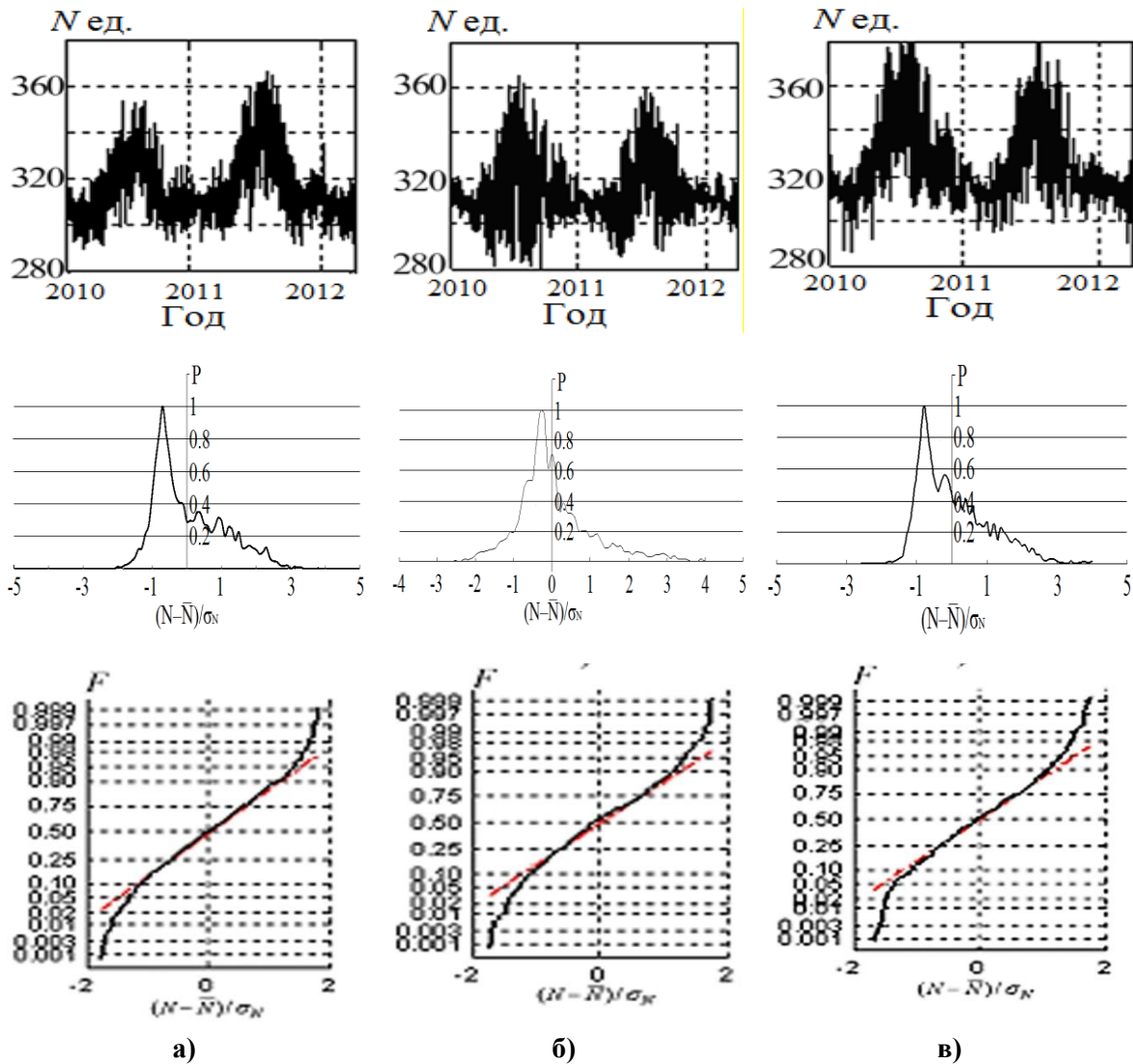


Рис. 1. Сезонная и суточная зависимость коэффициента преломления для городов Украины за несколько лет (1) и их плотности (2) и функции распределения (3): а- предгорье (Мукачево), б- степь (Харьков), в- побережье моря (Одесса).

Если рассматривать отдельно изменения коэффициента преломления в период с ноября по апрель и с апреля по ноябрь, то окажется, что для каждого из этих периодов можно использовать для описания плотности распределения коэффициента преломления локально нормальные распределения:

$$P_0(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{N0}} \exp\left(-\frac{(N - \bar{N}_0)^2}{\sigma_{N0}^2}\right) \quad (2)$$

$$P_1(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{N1}} \exp\left(-\frac{(N - \bar{N}_1)^2}{\sigma_{N1}^2}\right)$$

где i - сезон, причем 0 – соответствует зиме, 1 – лету;

$P_i(N)$ - плотность распределения для i - сезона;

\bar{N}_i, σ_{Ni} - среднее и среднеквадратичное значение коэффициента преломления для i сезона.

В целом, для описания распределения коэффициента преломления за год можно использовать полигауссовы распределения [3], которые ранее применялись для

описания помех в каналах связи [4]. Для этого можно использовать подход, который использовался для описания нестационарных помех от морской поверхности, суши и отражений от «ясного неба» [5-8]. При этом используется математический аппарат вложенных полумарковских процессов [8-10].

Числовые характеристики распределения коэффициентов преломления в январе и июле для городов, находящихся в разных регионах и климатических зонах Украины, приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Числовые характеристики распределения коэффициентов преломления в январе

Город	Высота над морем, м	\bar{N} , N ед.	σ_N , N ед.	Коэффициент. асимметрии.	Регион
Харьков	115	309.6	2.7	-0.68	Восток
Луганск	62	312.8	3.1	-0.73	Восток
Донецк	224	307.5	2.6	-1.15	Восток
Александрия	105	310.2	3.4	-0.76	Центр
Светловодск	85	311.6	3.8	-0.77	Центр
Николаев	50	315.6	3.5	-0.70	Юг
Килия	4	317.7	4.4	-0.44	Юг
Одесса	42	317.6	4.9	-0.31	Юг
Смела	68	311.3	3.7	-0.61	Центр
Черкассы	216	309.5	4.2	-0.58	Центр
Владимир-Волынский	194	309.7	4.2	-0.81	Запад
Луцк	232	310.8	2.9	-0.67	Запад
Львов	323	305.2	4.6	-0.85	Прикарпатье
Самбор	297	305.2	4.2	-0.58	Прикарпатье

Таблица 2. Числовые характеристики распределения коэффициентов преломления в июле

Город	Высота над морем, м	Среднее	СКО	Коэффициент. асимметрии.	Регион
Харьков	115	329.8	20.9	-0.51	Восток
Луганск	62	338.4	18.8	-0.67	Восток
Донецк	224	329.3	19.8	-0.32	Восток
Александрия	105	344.2	13.2	-1.00	Центр
Светловодск	85	350.9	16.5	-0.99	Центр
Николаев	50	349.9	13.1	-0.89	Юг
Килия	4	359.7	13.0	-0.97	Юг
Одесса	42	353.3	12.5	-0.69	Юг
Смела	68	344.2	13.5	-1.14	Центр
Черкассы	216	342.1	14.0	-0.87	Центр
Владимир-Волынский	194	338.4	12.0	-0.84	Запад
Луцк	232	343.1	11.2	-0.67	Запад
Львов	323	337.4	10.8	-0.90	Прикарпатье
Самбор	297	342.1	11.1	-0.63	Прикарпатье

Видно, что среднее \bar{N}_i и среднеквадратичное σ_{Ni} значение коэффициентов преломления N зимой для всех регионов имеют значительно меньшие значения, чем летом. Коэффициенты асимметрии распределения коэффициента преломления летом и

зимой сравнительно небольшие, что подтверждает гипотезу о возможности описания распределения в пределах сезона нормальным законом.

Следует отметить, что зимой для всех городов в средней полосе широт, независимо от их места нахождения коэффициент преломления тропосферы около $310 N$ единиц. В то же время летом максимальные его значения зависят от места расположения города. Для приморских городов он достигает $400 N$ единиц, в то время, как для других городов составляет около $360 N$ единиц. Суточные колебания температуры для городов с континентальным климатом больше, чем для приморских городов. Сильная нестационарность поведения коэффициента преломления, характерная для всех регионов приводит к тому, что статистики его распределения отличаются от стандартных гауссовых моделей, как отмечалось ранее. Это иллюстрируют рис. 1 (3), на которых приведены в масштабах, линеаризующих нормальный закон распределения, функции распределения за весь период наблюдения.

Следует отметить, что для приморских городов характерны большие средние и среднеквадратичные значения коэффициента преломления. Для всех распределений наблюдается затянутый «хвост» в сторону больших значений, а также более острая вершина, чем для нормального закона распределения - рис. 1 (2).

2. Сезонная изменчивость коэффициента преломления тропосферы над сушей в области субэкваториального муссонного климата

Вьетнам – рис. 2 расположен в области субэкваториального муссонного климата, но в силу большой протяженности страны с севера на юг (более чем на 15^0 по широте и всего $4...5^0$ по долготе), климатические условия на его территории существенно различаются. Зима на юге жаркая ($26^{\circ} C$), на севере прохладная ($15^{\circ} C$), температура воздуха иногда понижается до $1^{\circ} C$ из-за проникновения холодного воздуха из Китая. В горах на высоте более 1500 м случаются заморозки. Режим выпадения осадков также изменяется по территории Вьетнама. Зима сухая на юге и влажная на севере, а летом муссонные дожди поливают всю территорию страны. В конце лета и начале осени побережье Вьетнама посещают разрушительной силы тайфуны. На наветренных склонах гор в год выпадает $2500...3000$ мм осадков, на подветренных – $700...900$ мм. Климат значительно отличается между северным и южным Вьетнамом. На севере умеренный, изменчивый, тропический климат, существует прохладный сезон с ноября по апрель и жаркий с мая по октябрь. На юге Вьетнама тропический климат: теплый до очень жаркого в течение всего года, прохладнее с ноября по январь, жарко с февраля по май и сезон дождей с мая по октябрь.

Климатические особенности сказываются на сезонном и суточном поведении коэффициента преломления. На рис. 3 приведены сглаженные (за 30 суток) данные по коэффициенту преломления для двух крупнейших (Ханой-северная часть и Хошимин-южная часть) городов Вьетнама.

Используя сглаженные и исходные данные можно оценить изменение среднеквадратичного значения $\sigma_N(t)$ коэффициента преломления $N(t)$ по сезону:

$$\sigma_N(t) = \sqrt{(N(t) - \bar{N}(t))^2}, \quad (3)$$

$$\bar{N}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} N(t) dt - \text{скользящее среднее коэффициента преломления на интервале } T.$$

Видно, что наибольшие значения коэффициента преломления в летние месяцы – до 400 Нед., причем на севере Вьетнама (Ханой) и немного меньше (примерно на 5 Нед.) на юге (Хошимин).



Рис.2. Карта Вьетнама и расположение городов для которых исследовались коэффициенты преломления.

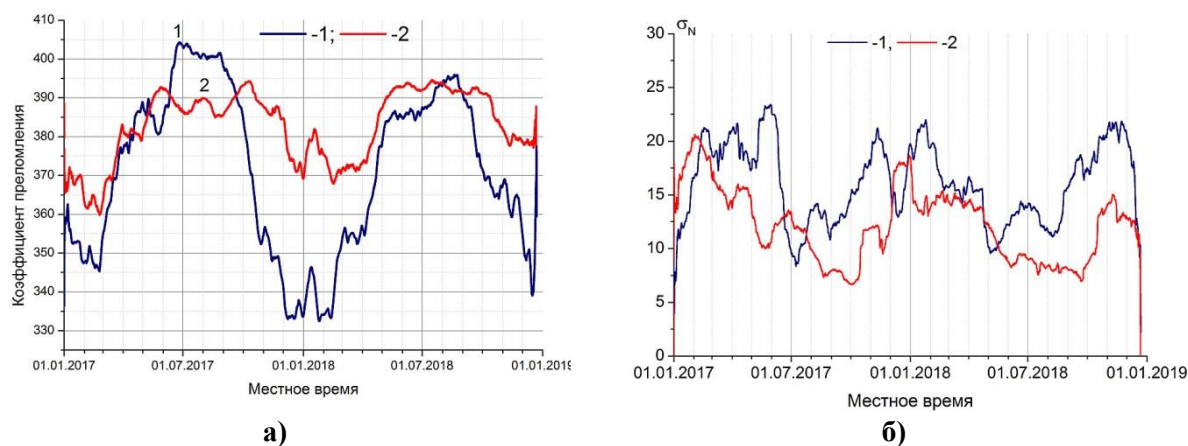


Рис.3. Сезонное изменение среднего (а) и среднеквадратичного (б) значений коэффициента преломления при оценке за 30 суток; 1-Ханой, 2-Хошимин.

В зимние месяцы его значения меньше – около 335 Нед. на севере и 370 Нед. на юге, причем, если для северных районов сезонный перепад достигает 60...70 Нед., то для южных он не превышает 20...25 Нед. Любопытно, что среднеквадратичное значение флуктуаций коэффициента преломления для Вьетнама, больше примерно в 1,5 раза в зимний период, чем летний в отличие от средней полосы широт, где максимальные флуктуации наблюдаются летом – рис.1(1). Сглаженные значения среднего и среднеквадратичного значений коэффициента преломления для различных регионов Вьетнама приведены на рис. 4.

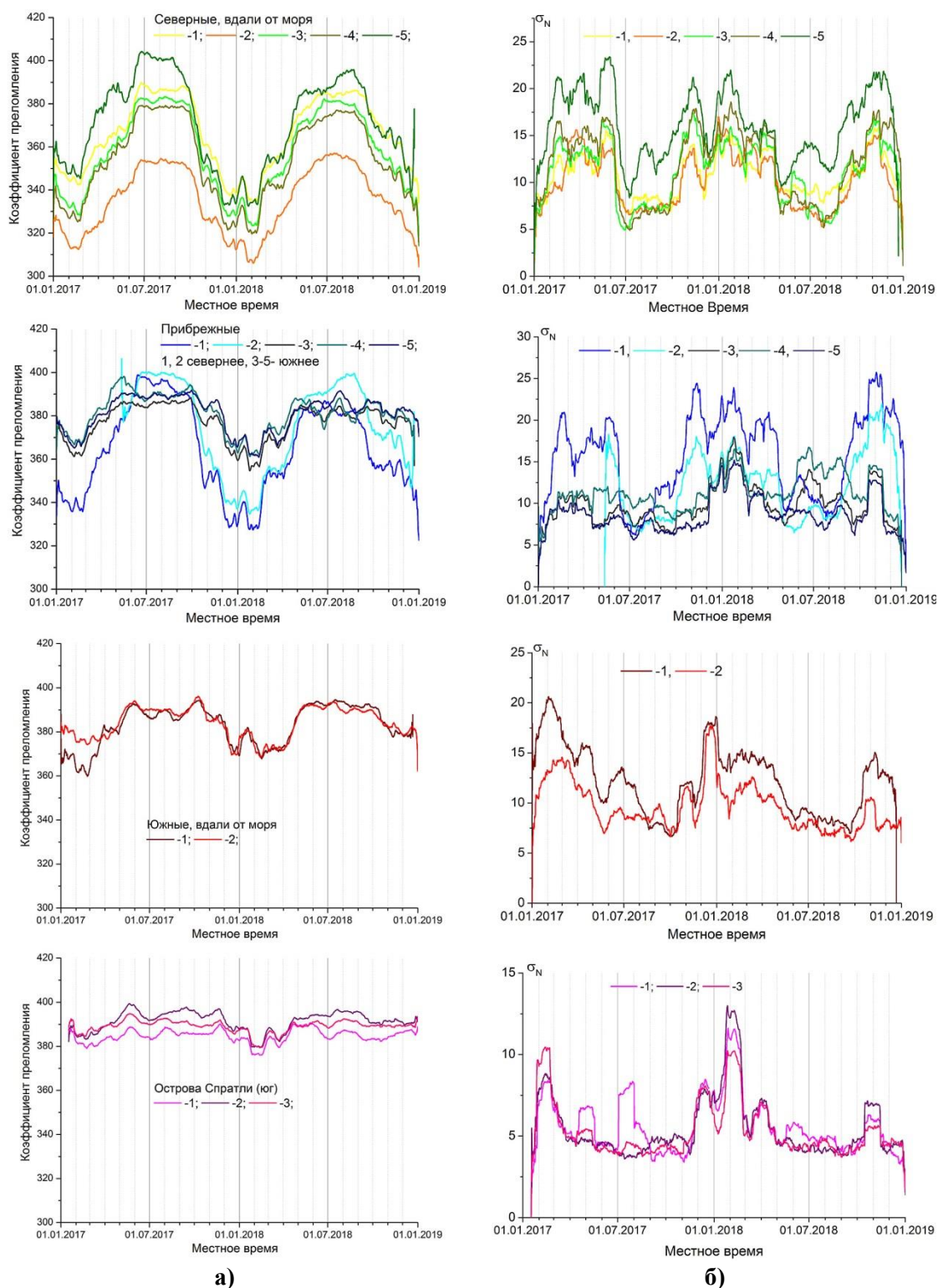
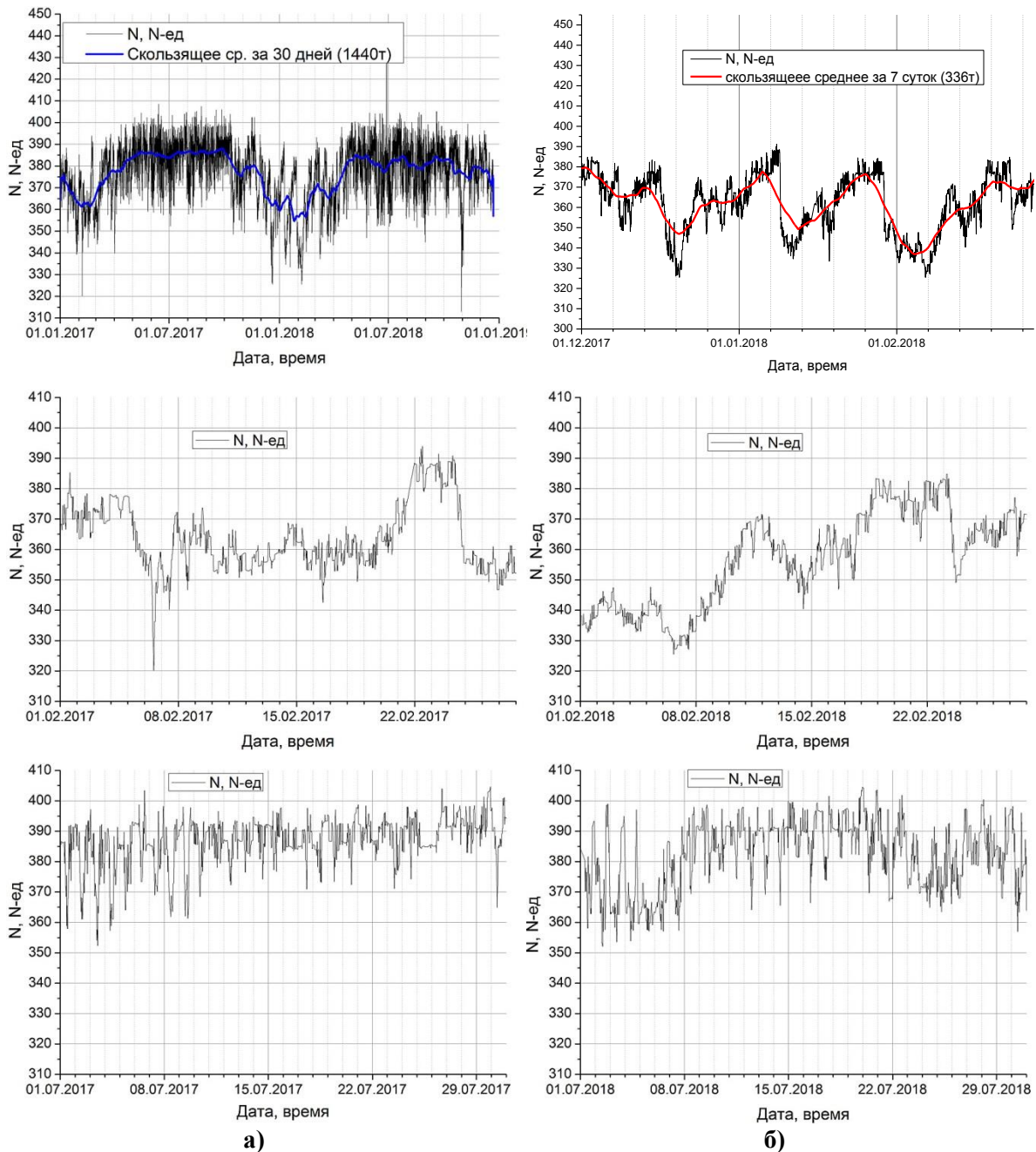


Рис.4. Сезонное изменение среднего (а) и среднеквадратичного (б) значений коэффициента преломления при оценке за 30 суток: 1. - Северная часть Вьетнама, 1 - Лаокай, 2 - Шонла; 3 - Каобанг, 4 - Лангшон; 5 - Ханой; 2. - Центральная часть, 1 - Монгкай, 2 - Хайфон; 3 - Дананг, 4 - Хюэ; 5 - Куанг Нгиа; 3. - Южная часть, 1 - Хошимин, 2 - Кантхо; 4. - Острова Спратли, 1 - Гуент Тране; 2 - Сон Ту Тау Саут-Вест Кеэ; 3 - Трунг-Са.

Приведенные данные подтверждают ранее сделанные выводы. Так при смещении к югу сезонный перепад значений коэффициента преломления между зимой и летом

снижается от 60...80 Нед. до 20...25 Нед., а для островов Спратли среди моря до 10...15 Нед. Максимумы приходятся на летние месяцы-июль-август., а минимальные значения на зимние – с декабря по февраль. Причем следует отметить, что при смещении к югу наблюдается уплощение сезонной зависимости для летнего периода. Для северной части Вьетнама в зимний период в январе могут наблюдаться вторые локальные максимумы с повышением на 10...20 Нед. средних значений по сравнению с соседними зимними месяцами. В тоже время максимальные флуктуации коэффициента преломления наблюдаются в зимний период, что не характерно для средней полосы широт. Для суточных изменений коэффициента преломления также характерны особенности. В качестве примера на рис. 5 приведены значения коэффициента преломления для прибрежного города Дананг южного Вьетнама.



**Рис.5. Изменения коэффициента преломления в Дананге (южный Вьетнам):
1(а) – аэропорт1(б) – метеостанция; 2(а) – февраль 2017г.. 2(б) – февраль 2018г.;
3(а) – июль 2017г., 3(б) – июль 2018г.**

Для всех регионов Вьетнама, как и для средней полосы характерно наличие суточных вариаций коэффициента преломления, как в летние (примерно 40...60 Нед.), так и в зимние (10...20 Нед.) месяцы. Кроме суточных изменений в зимний период могут происходить более длиннопериодные (с периодом 6..9 дней) флуктуации – рис.5 1(б), 2(а, б).

Заключение

1. Для области субэкваториального муссонного климата, так же, как и для средних широт максимальны значения коэффициента преломления летом и ниже зимой, причем межсезонная разница для приморских городов и островных зон ниже, чем для континентальной части. Если для северных районов Вьетнама сезонный перепад достигает 60...80 Нед. то для южных прибрежных регионов снижается до 20...25 Нед., а для островов Спратли среди моря не превышает 10...15 Нед.

2. В отличие от средних широт для области субэкваториального муссонного климата Вьетнама среднеквадратичные значения флуктуаций в зимний период выше, чем летом за счет наличия флуктуаций с большим, чем сутки периодом.

3. Законы распределения коэффициента преломления существенно отличаются от гауссовых, хотя распределения в течение сезона могут удовлетворительно описываться как гауссовыми моделями, так и распределениями Кравченко-Рвачева.

4. В целом для зоны области субэкваториального муссонного климата Вьетнама характерны особенности, отличные от его поведения для средних широт: сильная широтная зависимость сезонных перепадов, повышенный уровень флуктуаций зимой, наличие локальных максимумов не только суточных, но и с большим периодом изменения. Все это может приводить к увеличению ошибок оценки координат при использовании ГНСС, а значит, необходимы дальнейшие исследования для разработки моделей коррекции их влияния.

Эта работа поддерживается Министерством промышленности и торговли Вьетнама.

Литература

1. Михайлов Н. Ф., Рыжков А. В., Щукин Г. Г. Радиометеорологические исследования над морем. Л.: Гидрометиздат, 1990. 208с.
2. Anderson K. D. Inference of refractivity profiles by satellite-to-ground RF measurements / K. D. Anderson // Radio Sci.– 1982.– V. 17, № 3.– P. 653-663.
3. Чабдаров Ш. М. Полигауссовы представления произвольных помех и прием дискретных сигналов / Ш. М. Чабдаров, А. Т. Трофимов // Радиотехника и электроника.– 1975.– Т.20, №4.– С.734-745.
4. Новые классы полигауссовых моделей в статистической теории приема сигналов современных радиоэлектронных радиосистем / Ш. М. Чабдаров, А. Ф. Надеев, Р. Р. Файзуллин [и др.] // Прикладная радиоэлектроника.– Харьков.– 2002.– Т.1.– №2.– С. 171-180.
5. Луценко В. И. Имитационная модель сигнала обратного рассеяния от морской поверхности / И. В. Луценко // Успехи современной радиоэлектроники.– 2008.– №4.– С. 59-73.
6. Кравченко В.Ф. Имитационная модель сигнала обратного рассеяния от суши / В.Ф. Кравченко, В.И. Луценко, И.В. Луценко, Е.В. Кривенко, А.В. Соболяк // Физические основы приборостроения, 2015, Т.4, №4(17). –С.3-29.
7. Lutsenko V. I. Simulation Statistical Model of Reflection from the "Clear-Sky" / V. I. Lutsenko, S. I. Khomenko, A. Ye. Zatserklyany, I. V. Lutsenko // Telecommunications and Radio Engineering. - 2005. - V. 63, № 5. - P. 371-380.

8. Кравченко В.Ф., Луценко В.И., Луценко И.В. Рассеяние радиоволн морем и обнаружение объектов на его фоне // М. Физматлит, 2015. -448с.
9. Кравченко В.Ф., Луценко В.И., Масалов С.А., Пустовойт В.И. Анализ нестационарных сигналов и полей с использованием вложенных полумарковских процессов. Доклады академии наук. 2013. Т. 453. № 2. С. 151–154.
10. Кравченко В.Ф., Кравченко О.В., Луценко В.И., Луценко И.В., Чуриков Д.В. Восстановление информационных параметров природных сред с использованием атомарных и WA-систем функций. Обзор. Часть I. Применение теории полумарковских полей и финитных функций для описания нестационарных процессов // Физические основы приборостроения. 2014. Т. 3. № 2 (11). С. 3-17.