УДК 621.371.242:551.5

О.Н. Киселев

Мезомасштабные пространственно-временные флуктуации текущих значений индекса преломления вблизи земной поверхности*

Исследованы мезомасштабные неоднородности показателя преломления у поверхности земли с различным ландшафтом. При проведении радиоизмерений угла места они увеличивают погрешность расчета корректирующей поправки на атмосферную рефракцию. Предложено использовать параметр «отношение сигнал/шум» для радиометеорологических исследований.

Ключевые слова: мезомасштабные неоднородности, приземный слой атмосферы, атмосферная рефракция, отношение сигнал/шум.

Введение

Земная атмосфера вследствие своей неоднородности вносит в данные радиотехнических измерений систематические и случайные ошибки. Для коррекции результатов таких измерений был предложен метод [1], основанный на использовании значений индекса преломления N. Метод применяется как на наземных трассах, так и для наблюдения за космическими объектами [2]. Корректировка результатов РЛ наблюдений сводится к измерению текущих значений индекса преломления у земной поверхности N_S и использованию его для расчета корректирующих поправок на вертикальную рефракцию. Естественно, возникают вопросы о точности получаемых метеорологических данных и достоверности модели. Долгое время считалось, что первый фактор является основным препятствием для увеличения точности поправок и потому предъявлялись жёсткие требования к погрешностям метеорологических приборов [3]. Однако утверждается [4], что создание очень точных метеоприборов для измерений в одной точке вряд ли целесообразно, ибо причина большой остаточной ошибки корректировки кроется не в малой точности измерений, а в изменчивости метеовеличин вдоль радиолуча, что приводит к появлению случайной рефракции. Эти эффекты определяются наличием в тропосфере мезомасштабных неоднородностей (ММН), имеющих размеры от единиц до десятков километров и очень мало изученных [5]. Поэтому исследование их структуры представляется актуальным, ибо, как утверждается в [6], вариации коэффициента преломления радиоволн, обусловленные такими неоднородностями, могут превышать суточный ход атмосферных метеопараметров, а ошибки, вносимые ими в угол рефракции, «примерно на порядок превышают значение, полученное без учета влияния мезомасштабных волн».

Целью исследования является оценка пространственно-временной изменчивости индекса преломления на наземных сухопутных трассах. Основное внимание уделяется не абсолютным значениям индекса преломления, а отклонениям N_S в разнесенных точках от значения среднего по пространству и оценке на их основе статистических характеристик неоднородностей, возникающих в приземном слое атмосферы (ПСА) над поверхностью с разнообразными физико-метеорологическими характеристиками.

Условия проведения опытов

Эксперимент проведен в 1975–1977 гг. Для расчета N_S использованы ежечасные измерения температуры, давления, влажности (T, p, e) у земной поверхности на высоте 2 м (такие данные являются основой для учета рефракции в тропосфере). Статистика мезомасштабных флуктуаций N_S получена по данным в разных пунктах, разнесенных на расстояния от 7 до 44 км, в летние месяцы, когда локальные особенности метеоусловий над разными ландшафтными зонами выражены наиболее заметно. Расчет N выполнен по известной формуле [7], связывающий индекс преломления с температурой, давлением и влажностью.

* Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России». Государственный контракт № 02.740.11.0232.

Территория, где проводились опыты, расположена на юго-востоке Западно-Сибирской низменности. Местность равнинная с чередованием впадин, округлых возвышенностей и долин рек, частично покрытых смешанным лесами. Другая часть территории занята пашнями и лугами, чередующимися с оврагами и болотами. Расположение пунктов наблюдений выбрано так, чтобы иметь данные об основных типах подстилающей поверхности (участки повышенной влажности; хорошо проветриваемые сухие участки; луг, обрабатываемое поле; пункты с разнообразными видами ландшафтов).

Средние абсолютные значения N_S и их СКО

Такие оценки используются обычно для прогноза долговременных значений параметров сигналов или для описания радиометеорологического фона на трассах распространения радиоволн [7]. Предполагается, что эти параметры постоянны над земной поверхностью в пределах трассы. В действительности же и N_S, и σ_{N_S} могут изменяться уже на расстояниях в единицы километров за счет разных физико-метеорологических характеристик над участками с разным ландшафтом. Это хорошо иллюстрируется полученными нами данными, приведенными в таблице, где указан разброс средних за месяц величин $\overline{N_S}$. Временные изменения ежечасных значений N_S на каждом пункте наблюдений (будем называть их «мгновенные значения N_S») оценивались среднеквадратической величиной σ_{N_S} за месячный период.

Характеристики индекса преломления над пересеченной местностью

Год и месяц опытов	Изменчивость средних и СКО по годам	
	$\overline{N_S}$	σ_{N_S}
1975, июль	$\overline{N_S}=325\div332$ $\langle\overline{N_S}\rangle=328{,}4$	$\sigma_{N_S}=11{,}2\div12{,}9$ $\langle\sigma_{N_S}\rangle=11{,}9$
1976, июнь	$\overline{N_S}=326\div332$ $\langle\overline{N_S}\rangle=329{,}4$	$\sigma_{N_S}=13{,}2\div14{,}2$ $\langle\sigma_{N_S}\rangle=13{,}6$
1977, июнь	$\overline{N_S}=318\div323$ $\langle\overline{N_S}\rangle=320{,}1$	$\sigma_{N_S}=13{,}0\div15{,}4$ $\langle\sigma_{N_S}\rangle=14{,}2$

Значения СКО, осредненные по всем пунктам наблюдений каждого года опытов, обозначены как $\langle\sigma_{N_S}\rangle$. Здесь же представлены данные о $\langle\overline{N_S}\rangle$ – пространственно-временных средних за каждый год наблюдений.

Получено, что среднее отклонение единичных отсчетов величины N_S от пространственной средней доходят до 8N-ед. Максимальные мгновенные отклонения достигали значений 29N-ед.; время таких различий над участками местности с разными физико-метеорологическими свойствами связаны с периодами интенсивного нагревания почвы (первая половина дня) и ее охлаждения (первая часть темного времени суток). Высота расположения пунктов над уровнем моря колебалась от 103 до 161 м.

Оценка характеристик отклонений N_S от пространственной средней

При изучении распространения радиоволн в тропосфере индекс преломления измеряется вблизи линии передатчик – приемник, обычно в одной точке (N_{Si}). Предполагается, что этот параметр удовлетворительно характеризует средние метеоусловия вдоль всей трассы. Учитывая наличие пространственных флуктуаций структуры ПСА, оценим, какая ошибка δN_{Si} возникает при описании состояния радиоатмосферы по данным измерений в одной точке.

Пусть $\delta N_{Si}=N_{Si}-\langle N_S\rangle$, где $\langle N_S\rangle$ – «мгновенное» среднее по пространству значение индекса преломления по всем пунктам измерений, которое определяется как среднеарифметическое.

Величина δN_{Si} зависит, в основном, от таких факторов [8]: разные высоты расположения измерительных пунктов над уровнем моря; неоднородность свойств перемещающегося через пункты воздушного потока; разнообразие физико-метеорологических

свойств участков поверхности, что приводит к разной их ответной реакции на внешнее воздействие воздушного и теплового потоков. Так как наша задача состоит в выявлении вклада неоднородностей земной поверхности в формирование структуры поля N_S в ПСА, вклад прочих факторов следует, по возможности, свести к минимуму.

Влияние перепада высот уменьшено путем перерасчета измеренных величин N_{Si} к высоте одного из пунктов (108 м) по формуле [7]

$$N(h) = N_{Si} - (h - h_{Si}) \cdot \Delta 7{,}32 \cdot e^{0{,}005577 \cdot N_{Si}},$$

где h_{Si} – высота пункта измерений величины N_{Si}, данные которого требуют перерасчета [км]; h – высота, к которой приводятся данные всех пунктов [км]; $N(h)$ – рассчитанный индекс преломления для высоты h; в нашем случае $N(h) = N(0{,}108)$.

ММН, имеющиеся во внешнем потоке воздуха, который перемещается над землей, согласно данным работы [8], имеют малую интенсивность. Поэтому при проведении наших исследований они не принимались во внимание.

Проведенный пересчет N_{Si} к одному уровню позволил получить оценки интенсивности пространственных ММН в приземном слое, зависящие, в основном, только от характеристик земной поверхности. Рисунок 1 иллюстрирует изменение среднего значения СКО и наибольших отклонений индекса преломления, как положительных (ОТКЛ$_{макс}$), так и отрицательных (ОТКЛ$_{мин}$), от средней по пространству величины $\langle N_S \rangle$ за весь период экспериментов. Средняя пространственно-временная величина СКО равна 5,2N-ед. Днем (с 10 до 20 ч) отклонения максимальны и нестабильны; их величина равна $5{,}8^{+2{,}6}_{-1{,}8}$ N-ед. В ночное время (с 01 до 06 ч) флуктуации $\langle \sigma_{N_S} \rangle$ меньше и равны $3{,}6^{+0{,}4}_{-0{,}5}$ N-ед.; в отличие от дневного периода они относительно стабильны в пространстве и во времени.

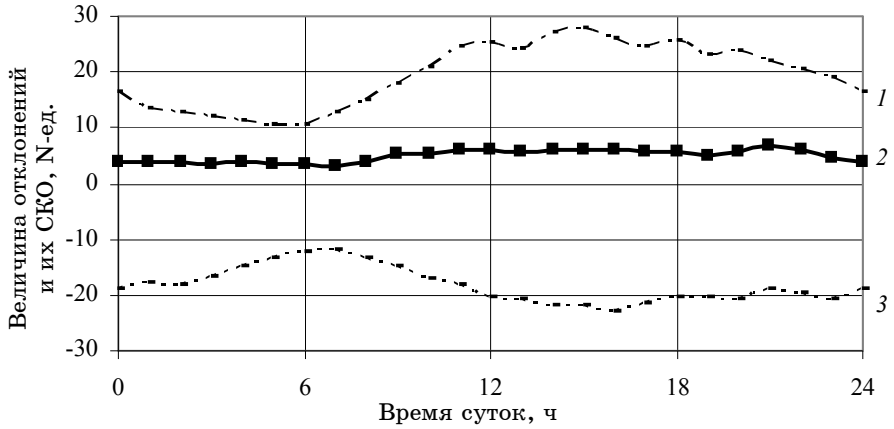

Рис. 1. Суточные изменения максимальных и минимальных значений δN_{Si} и их СКО: *1* – ОТКЛ$_{макс}$; *2* – ОТКЛ$_{сред}$; *3* – ОТКЛ$_{мин}$

Отклонения δN_{Si} в приземном слое атмосферы возникают вследствие наличия на земной поверхности «пятен» локальных неоднородностей – отклонений температуры от некоторой их средней пространственной величины. Наличие таких «пятен», состоящих из ряда относительно теплых или холодных «факелов», зафиксировано экспериментально [9] и объяснено теоретически [10]. Температурные неоднородности в ПСА сосуществуют с неоднородностями влажности, которые также возникают над различными по степени увлажнения участками поверхности [11]. Наличие неоднородностей температуры и влажности неизбежно приводит к формированию неоднородностей индекса преломления.

Так как величина δN_{Si} формируется несколькими заметно разными по своей интенсивности факторами, она не подчиняется закону Гаусса. Проверка этого факта выполнена с использованием критерия согласия Колмогорова. Вероятность признания гипотезы о том, что эмпирические данные подчиняются закону Гаусса, чрезвычайно мала (менее 10^{-7} при числе опытов n = 6000).

При разделении всего массива данных на части с более-менее однородными физико-метеорологическими условиями различия нормального и статистического распределений уменьшаются. Выделение таких временных интервалов возможно, в зависимости от метеорологической обстановки, как в течение полных суток, так и в дневное и ночное время. На рис. 2 представлена иллюстрация высказанного положения для двух интервалов суток – дневного и ночного, когда вероятность выполнения гипотезы о нормальном распределении опытных данных увеличивается до 10^{-6} днем (n=3336) и до 0,05 ночью (n=1819). В ночное время различия между участками резко уменьшаются за счет исключения такого мощного внешнего воздействия, каким является солнечный радиационный нагрев.

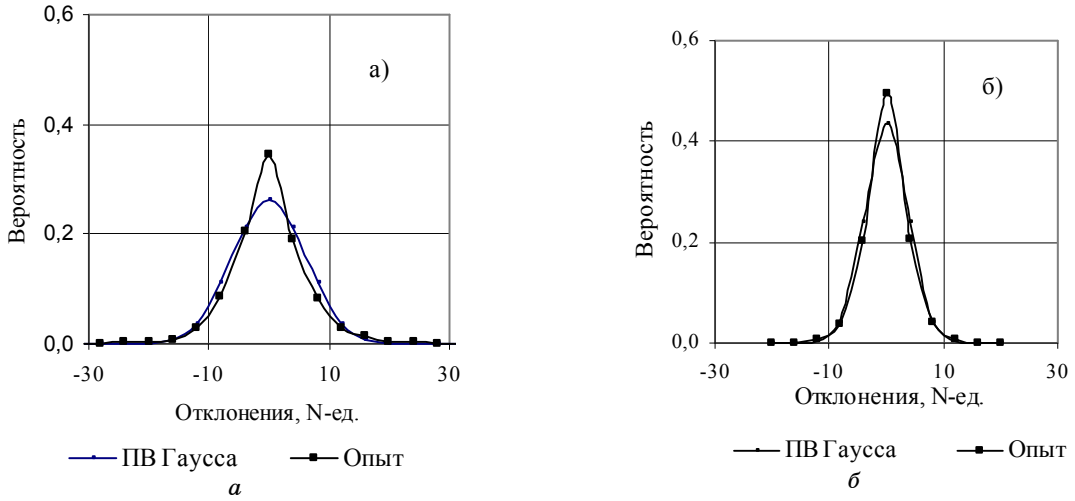

Рис. 2. Функции плотности вероятностей (ПВ): *а* – в дневное; *б* – ночное время

Изучение характеристик δN_{Si} для разных ландшафтных зон позволило выделить участки земной поверхности как с повышенной (пониженной) величиной N_S, так и участки со средним (нулевым или близким к нему) значением этого параметра относительно $\langle N_S \rangle$. Такие явления демонстрируются на рис. 3, где представлены результаты опытов 1977 г. Среднемесячные значения δN_{Si} на пункте П1 (ГМС – повышенная влажность) в период опытов превышали (в среднем) величину $\langle N_S \rangle$, в то время как на пункте П7 (полигон – сухой участок) зафиксирована отрицательная величина δN_{Si}. Отмеченное повышенное значение N_S в пункте П1 не является его постоянным свойством. В предшествующие два года на этом пункте δN_{Si} колебалось около нулевого значения. Это обстоятельство является следствием различия общих метеорологических условий 1977 г. и 1975–1976 гг., что можно видеть по существенной разнице (на 8–9 N-ед.) пространственно-временных средних за месяц величин N_S в эти годы (см. таблицу).

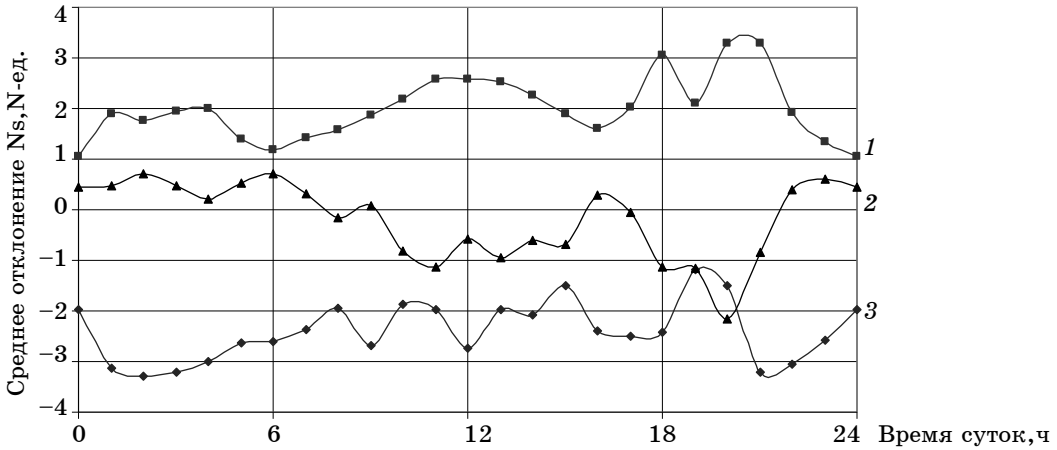

Рис. 3. Отклонения индекса преломления для разных пунктов наблюдений:
1 – П1 – ГМС; *2* – П2 – АМСГ; *3* – П7 – полигон

Выводы. Влияние ММН на результаты радиоизмерений

Погрешности определения угла рефракции радиоволн по наземным метеоизмерениям N_S с учетом наличия мезонеоднородностей в ПСА были определены на основе результатов работы [12], где приведены формулы для расчета ошибок измерения угловых координат объектов радиотехническими методами с использованием коррекции по величине N_S. Наличие случайных ММН увеличивает эту ошибку в три-четыре раза. Такие результаты согласуются с данными работы [6].

Мезомасштабные неоднородности также заметно влияют на результаты радиометеорологического корреляционного анализа, часто проводимого при изучении распространения радиоволн. В таких исследованиях одной из характеристик метеорологического «сигнала» – изменяющейся величины N_S – является σ_{N_S}. При этом упускается из вида, что свойство этого «сигнала» существенно зависит от величины метеорологического «шума», в качестве которого выступают флуктуации, создаваемые ММН [13], и который следует учитывать введением радиометеорологического параметра сигнал/шум, равного величине $\gamma = \sqrt{\left\langle \left(\delta N_{Si}\right)^2 \right\rangle} \Big/ \sigma_{N_S}$. (В метеорологии используется аналог этого параметра – мера случайной ошибки наблюдений, равная $\Delta = 1/\gamma$). Можно полагать, что использование этого параметра объяснит существенный разброс результатов радиометеорологического анализа, выполненного при различных метеорологических условиях проведения экспериментов.

Благодарю М.А. Крутикова за постоянное внимание к работе и А.А. Мещерякова, Л.И. Кижнер за помощь при её выполнении.

Литература

1. Арманд Н.А. О рефракции радиоволн в тропосфере / Н.А. Арманд, М.А. Колосов // Радиотехника и электроника. – 1965. – № 8. – С. 1401–1409.

2. Карачевцев А.М. Об особенностях учета влияния рефракции радиоволн при проведении траекторных измерений по объектам в верхних слоях атмосферы и космическом пространстве / А.М Карачевцев., А.А. Котов, В.А. Сорокин // 22-я Всерос. науч. конф. «Распространение радиоволн»: труды конф. – Воронеж, 2008. – Т. 1. – С. 298–301.

3. Воронцов П.А. Современные методы аэрологических исследований пограничного слоя атмосферы / П.А. Воронцов, Г.Г. Щукин. – Обнинск, 1974. – 29 с.

4. Бартон Д. Справочник по радиолокационным измерениям / Д. Бартон, Г. Вард; пер. с англ.; под ред. М.М. Вейсбена. – М.: Сов. радио, 1976. – 392 с.

5. Бызова Н.Л. Турбулентность в пограничном слое / Н.Л. Бызова, В.Н. Иванов, Е.К. Гаргер – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 263 с.

6. Хуторова О.Г. Вариации коэффициента преломления радиоволн, обусловленные мезомасштабными неоднородностями в тропосфере / О.Г. Хуторова, Г.М. Тептин // 21-я Всерос. науч. конф. «Распространение радиоволн»: труды конф. – Йошкар-Ола, 2005. – С. 393–396.

7. Бин Б.Р. Радиометеорология / Б.Р. Бин, Е.Дж. Даттон; пер. с англ.; под ред. А.А. Семенова. – Л.: Гидрометиздат, 1971. – 361 с.

8. Монин А.С. Прогноз погоды как задача физики. – М.: Наука, 1969. – 184 с.

9. Оке Т.Р. Климат пограничного слоя. – Л.: ГМИ, 1982. – 360 с.

10. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 509 с.

11. Самохвалов И.В. Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности / И.В. Самохвалов, Ю.Д. Копытин, И.И. Ипполитов. – Новосибирск: Наука, 1987. – 262 с.

12. Арманд Н.А. Экспериментальные и теоретические методы определения углов рефракции в нейтральной атмосфере / Н.А. Арманд, М.А. Колосов, М.А. Шабельников // Распространение радиоволн. – М.: Наука, 1975. – С. 46–55.

13. Гандин Л.С. Статистические методы интерпретации метеорологических данных / Л.С. Гандин, Р.Л. Каган. – Л.: Гидрометиздат,1976. – 360 с.

Киселев Олег Николаевич
Канд. техн. наук, доцент, с.н.с. НИИ радиотехнических систем ТУСУРа
Тел.: (3822) 41-38-89
Эл. почта: rwplab@ms.tusur.ru

Kiselev O.N.
Mesoscale spatial and temporal fluctuations of the current values of refraction index near the earth surface

The mesoscale inhomogeneities of refractive index on the earth's surface to different landscapes are investigated. When conducting the radio measurements of elevation angle they increase an error in the calculation of correction for the atmospheric refraction. It is proposed to use “SNR” for radiometeorological studies.
Keywords: mesoscale inhomogeneities, surface layer of the atmosphere, atmospheric refraction, signal to noise ratio.